



**Aalto-yliopisto**  
Insinööritieteiden  
korkeakoulu

Juuso Nissinen

## **Menetelmä alueellisen hybridienergiaratkaisun analysointiin suunnitteluprosessin alkuvaiheessa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 2.4.2019

Valvoja: Professori Markku Virtanen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Tuomo Vähätiitto

---

**Tekijä** Juuso Nissinen

---

**Työn nimi** Menetelmä alueellisen hybridiennergia ratkaisun analysointiin suunnittelu-  
prosessin alkuvaiheessa

---

**Maisteriohjelma** Energy Technology

**Koodi** ENG21

---

**Työn valvoja** Professori Markku Virtanen

---

**Työn ohjaaja(t)** Diplomi-insinööri Tuomo Vähätiitto

---

**Päivämäärä** 2.4.2019

**Sivumäärä** 81

**Kieli** suomi

---

### Tiivistelmä

Rakennetun ympäristön energian käyttö on tänä päivänä suosittu tutkimuksen aihealue. Alueelliset hybridiennergia ratkaisut mahdollistavat uusiutuvien energianlähteiden käytön lisäämisen rakennetussa ympäristössä. Tämän lisäksi ne luovat mahdollisuuksia energia- ja kustannussäästöjen saavuttamiseen energian tarpeiden ja tuotannon tarkemman yhdistämisen johdosta. Näistä syistä alueelliset hybridiennergia ratkaisut ovatkin saamassa enenevässä määrin huomiota rakennettuun ympäristöön liittyvässä teollisuudessa. Alueellisella hybridiennergia ratkaisulla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa järjestelmää, jossa pienehkön alueen energian tarpeita palvellaan kahdesta tai useammasta energian lähteestä paikallisesti tuotettavalla energialla. Ne voivat olla joko liitoksissa ulkopuolisiin energiaverkkoihin tai toimia omana kokonaisuutenaan.

Tässä tutkimuksessa kehitettiin menetelmä alueellisten hybridiennergia ratkaisujen analysointiin. Menetelmä on tarkoitettu suunnitteluprosessin alkuvaiheeseen ja sillä voidaan tarkastella järjestelmässä esiintyviä energian tuotannon, siirron ja tarpeiden välisiä energiavirtoja. Järjestelmän elinkaarikustannuksia voidaan myös arvioida. Yhdessä menetelmän kanssa kehitettiin sen tueksi myös taulukkolaskentapohjainen analyysityökalu. Menetelmää ja laskentatyökalua sovellettiin Kittilässä sijaitsevaan Levin hiihtokeskukseen suunnitellun alueellisen hybridiennergia järjestelmän analysointiin.

Tällä työllä oli kaksi päätavoitetta. Kehittää tarkoituksenmukainen menetelmä alueellisten hybridiennergia ratkaisujen analysointiin sekä tuottaa tietoa Levin energia järjestelmän ratkaisusta ja teknistaloudellisesta suorituskyvystä. Analyysimenetelmä todettiin Levin tutkimukseen sopivaksi, minkä lisäksi sitä on mahdollista käyttää tulevaisuudessa myös muissa projekteissa. Toisaalta kehitetylle menetelmälle ja laskentatyökalulle havaittiin myös useita jatkokehityskohteita. Levin esimerkkitapauksen tarkasteluissa laskettiin ensin alueen energian tarpeiden profiilit. Tämän jälkeen analysoitiin muutamia erilaisia alueellisen hybridiennergia järjestelmän ratkaisuja, joita vertailtiin elinkaarikustannusten perusteella. Taloudellisesti parhaat ratkaisut perustuivat pääosin metsähakkeen polttoon. Kaiken kaikkiaan Levin alueellisen hybridiennergia järjestelmän todettiin olevan taloudellisesti kannattava hanke.

---

**Avainsanat** alueellinen energia järjestelmä, energian tuotanto, energiatehokkuus, elinkaarikustannus, analyysimenetelmä

---

---

**Author** Juuso Nissinen

---

**Title of thesis** Early planning phase analysis method for a community level hybrid energy system

---

**Master programme** Energy Technology

---

**Code** ENG21

---

**Thesis supervisor** Professor Markku Virtanen

---

**Thesis advisor(s)** Tuomo Vähätiitto, M. Sc. (Tech)

---

**Date** 2.4.2019

---

**Number of pages** 81

---

**Language** Finnish

---

### Abstract

Energy use in built environment is a popular research topic in today's world. Community level hybrid energy systems present an opportunity to increase the penetration of renewable energy sources in built environment. In addition, they create possibilities for energy and cost savings due to tighter coupling of energy sources and demands. These hybrid energy solutions are therefore gaining more and more attention in the industry. In this study, community level hybrid energy systems are taken as small scale microgrids with multiple energy carriers in which energy is produced locally from two or more sources. They can be operated in grid connected or islanded modes.

In this work, an analysis method is developed for community level hybrid energy systems. The method is intended for early planning stages and it includes means to evaluate the energy flows from energy generation to distribution to demands. Lifecycle costs of the system can also be evaluated. In conjunction with the method, a spreadsheet-based calculation tool is developed. The method, and the associated calculation tool are then used in a case-study involving the Levi ski resort located in Kittilä, Finland.

The goals for this work were twofold: to develop a suitable analysis method and to provide information about the technoeconomic feasibility of the community level hybrid energy system planned in Levi ski resort. The analysis method was found to be sufficient for the case study and possible future projects although many improvements could still be made. In the case-study, energy demand profiles were first calculated. After that, few alternative solutions for the energy system were analyzed and compared based on life cycle costs. The best solutions were found to be based mostly on woodchip fuels. Overall, the community level hybrid energy system planned for Levi ski resort was found to be a profitable endeavor.

---

**Keywords** community level energy system, energy production, energy efficiency, lifecycle cost, analysis method

---

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopistossa TA-Yhtiöiden tilauksesta. Työn valvojana toimi Aalto-yliopiston professori Markku Virtanen ja ohjaajana toimi Tuomo Vähätiitto TA-Yhtiöiltä. Haluan kiittää sekä TA-Yhtiöitä, että Aalto-yliopistoa erittäin mielenkiintoisesta, joskin melko työläästä diplomityön aiheesta.

Haluan kiittää myös valvojaani Markkua sekä ohjaajaani Tuomoa heidän antamastaan panoksesta työn loppuun saattamisessa. Lisäksi kiitokset TA-Yhtiöiden Jaakko Sorvarille, joka hankki minulle lähtötietoja työssä tekemiäni analyyseja varten.

Lopuksi vielä kiitos perheelleni ja ystävilleni, jotka auttoivat minua selviämään koko tutkinnon suorittamisesta.

Espoo 2.4.2019

Juuso Nissinen

# Sisällysluettelo

Alkusanat .....	4
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät .....	7
Lyhenteet .....	8
1 Johdanto .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta .....	2
1.2 Tutkimuksen tavoite .....	2
1.3 Tutkimusongelma .....	2
1.4 Tutkimusmenetelmä ja rajaukset .....	3
2 Alueellinen hybridienergiajärjestelmä .....	4
2.1 Alueellisen energiajärjestelmän rakenne ja taseet .....	4
2.2 Alueellisen energiajärjestelmän suunnittelu .....	6
3 Rakennusten energian käytön ennakointi .....	9
3.1 Rakennuksen energiatase .....	9
3.2 Energian tarpeen simulointi .....	10
3.3 Yksinkertaistettu energian tarpeen dynaaminen laskenta .....	11
3.3.1 Solmupistemalli ja lämpötaseyhtälöt .....	11
3.3.2 Differenssimenetelmä .....	13
3.3.3 Konduktanssit ja lämpökapasiteetit .....	14
3.3.4 Lämpökuormat .....	15
3.3.5 Ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmöntarpeet .....	17
3.3.6 Sähköenergian tarpeen laskenta .....	19
3.3.7 Taloteknisten järjestelmien häviöt .....	19
3.3.8 Energialaskennan kulku .....	20
4 Energian tuotanto .....	22
4.1 Lämpökattilalaitos .....	22
4.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto .....	24
4.3 Lämpöpumppu ja maalämpö .....	25
4.4 Aurinkolämpö .....	31
4.5 Aurinkosähkö .....	34
4.6 Puskurivaraaja .....	36
5 Elinkaarikustannukset .....	39
6 Analyysimenetelmän kehittäminen .....	41

6.1	Menetelmän yleinen periaate .....	41
6.2	Energian tarpeiden arviointi .....	44
6.3	Energiajärjestelmän mallinnus .....	44
6.4	Kustannuslaskenta.....	46
6.5	Menetelmän kehitys jatkossa .....	47
7	Levin Koutalaen alueen analyysit .....	48
7.1	Koutalaen alue.....	48
7.2	Koutalaen alueen energian tarpeet .....	49
7.2.1	Nykyisen rakennuskannan energian tarpeet .....	49
7.2.2	Tulevan rakennuskannan energian tarpeet: 1. vaihe .....	52
7.2.3	Tulevan rakennuskannan lopulliset energian tarpeet.....	56
7.3	Koutalaen alueellinen hybridienergiaratkaisu.....	60
7.3.1	Analyysin lähtökohdat .....	61
7.3.2	Energiajärjestelmän nykyinen suunnitelma .....	67
7.3.3	Elinkaarikustannusten vertailu.....	71
7.4	Analyysitulosten tarkastelu .....	72
8	Johtopäätökset ja yhteenveto .....	76
	Lähteet .....	78

## Merkinnät

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Pinta-ala
$C$	[J/K]	Lämpökapasiteetti
$E$	[J]	Energia
$\dot{E}$	[W]	Energiavirta
$F$	[-]	Korjauskerroin, Näkyvyyskerroin
$H$	[W/K]	Lämpökonduktanssi, Lämpökapasiteettivirta
$I$	[W/m <sup>2</sup> ], [€]	Säteilyvoimakkuus, Investointi
$K$	[€]	Kulu
$P$	[€]	Nykyarvo
$Q$	[J]	Lämpöenergia
$\dot{Q}$	[W]	Lämpöteho
$S$	[€]	Jäännösarvo
$T$	[K], [€]	Lämpötila, Tuotto
$U$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Lämmönsiirtokerroin, U-arvo
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Tilavuus
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Tilavuusvirta
$W$	[J]	Työ
$\dot{W}$	[W]	Teho
$a_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin
$a_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	Toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin
$a_j$	[-]	Yksittäisen suorituksen diskonttaustekijä
$a_n', a_n''$	[-]	Jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä
$c_p$	[J/(kgK)]	Ominaislämpökapasiteetti
$f$	[-]	Inflaatio
$g$	[-]	Kokonaisläpäisysuhde
$i$	[-]	Nimelliskorko
$j$	[-]	Indeksi
$k$	[-]	Kerroin
$\dot{m}$	[kg/s]	Massavirta
$n$	[h], [a]	Tarkasteluajan pituus
$q_{50}$	[m <sup>3</sup> /(hm <sup>2</sup> )]	Ilmanvuotoluku
$r$	[-]	Reaalikorko
$s$	[m]	Pituus
$t$	[s]	Aika
$v$	[m/s]	Nopeus
$x$	[-]	Kerroin
$\alpha$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Lämmönsiirtokerroin
$\eta$	[-]	Hyötysuhde
$\theta$	[°]	Osumakulma
$\lambda$	[W/(mK)]	Lämmönjohtavuus
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tiheys
$\tau$	[-]	Läpäisysuhde
$(\tau\alpha)$	[-]	Transmissio-absorptiotulo

## Lyhenteet

CFD	Computational fluid dynamics (Numeerinen virtausdynamiikka)
CHP	Combined heat and power (Sähkön ja lämmön yhteistuotanto)
COP	Coefficient of performance (Lämpökerroin, kylmäkerroin)
HHV	Higher heating value (Kalorimetrinen lämpöarvo)
HV	Heating value (Lämpöarvo)
KPA	Kotimainen polttoaine
LCOE	Levelized cost of energy (Energian ominaishinta)
LHV	Lower heating value (Tehollinen lämpöarvo)
LTO	Lämmöntalteenotto
SFP	Specific fan power (Ominais sähköteho)
VBA	Visual basic for applications



# 1 Johdanto

Ilmaston lämpenemiseen ja sen ympäristövaikutuksiin on kiinnitetty kolmen viimeisen vuosikymmenen aikana enenevässä määrin huomiota, minkä seurauksena on solmittu useita kansainvälisiä sopimuksia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Esimerkkinä voidaan mainita Euroopan Unionissa asetetut tavoitteet, jotka pyrkivät vuoteen 2030 mennessä vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta ja lisäämään uusiutuvan energian osuuden 27 %:in energian loppukäytöstä (Ympäristöministeriö 2018a). Yleensä tällaiset tavoitteet pyritään saavuttamaan vähentämällä fossiilisten polttoaineiden osuutta energian kokonaiskulutuksessa ja vastaavasti lisäämällä uusiutuvien energian lähteiden osuutta sekä parantamalla energian käytön tehokkuutta.

Energian käytön tehokkuus ja uusiutuvien energian lähteiden hyödyntäminen ovat tärkeitä näkökulmia myös rakennetun ympäristön saralla, joka etenkin Suomen kylmässä ilmastossa on vastuussa merkittävästä osasta energian kokonaiskulutuksesta. Pelkästään rakennusten lämmityksen osuus kaikesta energian loppukäytöstä oli Suomessa 26 % vuonna 2016 (Suomen virallinen tilasto 2017). Rakennusten energiatehokkuudelle onkin Suomen lainsäädännössä jo pitkään asetettu vaatimuksia, mutta nämä eivät suinkaan ole ainoa syy tavoitella parempaa energiatehokkuutta tai suurempaa uusiutuvien energian lähteiden osuutta rakennetussa ympäristössä. Oikein toteutettuna energian säästöön johtavat toimenpiteet voivat tuottaa rakennusta käyttäville tahoille myös taloudellisia hyötyjä pienentyneiden energiakustannusten kautta.

Rakennetun ympäristön energiatehokkuuden parantamisen ja uusiutuvien energioiden osuuden lisäämisen ongelmaa voidaan lähestyä monesta näkökulmasta. Yksi mahdollinen ratkaisu näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on toteuttaa niin kutsuttu alueellinen hybridienergiajärjestelmä. Tässä yhteydessä alueellisella hybridienergiajärjestelmällä tarkoitetaan sellaista systeemiä, joka kykenee toimittamaan useista energian lähteistä paikallisesti tuotettua energiaa asiakkailleen ja joka ei suoranaisesti ole osa laajempaa energiaverkkoa, kuten valtakunnallista sähköverkkoa tai kaukolämpöyhtiön hallinnoimaa lämmitysverkkoa. Alueellinen hybridienergiajärjestelmä voi kuitenkin tarvittaessa olla vuorovaikutuksessa sen ulkopuolisten energiaverkkojen kanssa. Ilmastotavoitteiden kannalta alueellisilla hybridienergiajärjestelmillä on yksi merkittävä hyöty perinteisiin energiaverkkoihin verrattuna. Tämä on paikallisten ja uusiutuvien energian lähteiden tyypillisesti suurempi osuus tuotannossa (Gu et al. 2014, Fathima & Palanisamy 2015, Gabrielli et al. 2018).

Levin Koutalaelle on suunnitteilla alueellinen energiaverkko, joka tuottaa ja toimittaa energiaa alueelle rakennettavalle vapaa-ajan keskukselle. Koutalaen alueen rakennuskannan tarvitsema energia tuotetaan hybridienergiakeskuksessa, jonne alueen eri energianlähteitä hyödyntävät tuotantoyksiköt on keskitetty. Alueellisen hybridienergiajärjestelmän rakentaminen on osa Koutalaen alueen vapaa-ajan keskuksen laajennusta. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on kehittää sopiva analyysimenetelmä ja laskentatyökalu alueellisen hybridienergiajärjestelmän esisuunnitteluvaiheeseen sekä soveltaa tätä menetelmää Koutalaen alueellisen energiajärjestelmän tarkasteluun. Työhön sisältyvillä analyyseillä pyritään osoittamaan kehitetyn menetelmän ja työkalun toimivuus sekä löytämään suuntaa antavia tietoja Koutalaen alueellisen hybridienergiajärjestelmän toteutukseen.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Taustana tämän tutkimuksen tekemiseen oli pyrkimys parantaa Levin Koutalaelle suunnitellun vapaa-ajan keskuksen alueellisen hybridienergiajärjestelmän ratkaisujen kartoittamisen valmiuksia. Alueellisen energiajärjestelmän ytimenä tulisi tämän hetkisten suunnitelmien mukaan toimimaan niin kutsuttu hybridienergiakeskus, joka koostuisi metsähaketta polttavasta lämpökattilalaitoksesta, pienen mittakaavan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksista, maalämpölaitoksesta sekä aurinkoenergiaa hyödyntävästä tuotantolaitoksesta. Hybridienergiakeskuksen mitoitus on tarkoitus tehdä koko Koutalaen alueen laajennuksen jälkeisen rakennuskannan mukaan, joka on yhteensä noin 66 000 kerros-m<sup>2</sup> (k-m<sup>2</sup>). Osa tästä rakennuskannasta (noin 19 000 k-m<sup>2</sup>) on jo olemassa. Loput noin 47 000 k-m<sup>2</sup> rakennetaan alueelle vaiheittain. Tämä uusi rakennuskanta tulisi näillä näkymin sisältämään kylpylähotellin, mökkejä ja muuta liiketoimintaa palvelevaa infrastruktuuria. Levin Koutalaen vapaa-ajan keskuksen laajennusta suunnittelee TA-Yhtiöt, joka toimii myös tämän tutkimuksen tilaajana.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää menetelmä ja laskentatyökalu alueellisen hybridienergiaratkaisun energiavirtojen ja sen teknistaloudellisten ratkaisuvaihtoehtojen analysointiin. Tarkoituksena on, että menetelmän avulla voidaan tarkastella alueellisen hybridienergiaratkaisun vaihtoehtoisia teknologioita niin energiatehokkuuden, kuin myös kustannusvaikutusten näkökulmasta. Kehitettyä menetelmää sovelletaan Koutalaen alueen energiaratkaisun analysointiin ja tavoitteena on saada yksityiskohtaista suunnittelua ohjaavaa tietoa hybridienergiakeskuksen tehokokoluokasta siten, että se voidaan toteuttaa taloudellisesti järkevästi ja että se kattaa alueen energian tarpeen sen rakentuessa vaiheittain. Vaikka tämä työ toteutetaankin Koutalaen alueellinen energiaratkaisu silmällä pitäen, tarkoituksena on, että menetelmää voidaan soveltaa myös mahdollisissa tulevaisuuden alueellisissa hankkeissa. Näin ollen menetelmän tulee lisäksi olla sekä yleispätevä, että käyttäjäystävällinen.

## 1.3 Tutkimusongelma

Tutkimusongelmana on löytää sopiva ja suhteellisen yleispätevä menetelmä alueellisten energiaratkaisujen analysointiin ja tutkia sen avulla Levin Koutalaen alueellisen hybridienergiajärjestelmän toteutusmahdollisuuksia. Pääasiallisia tutkimuskysymyksiä on kolme:

1. Miten menetelmä ja laskentatyökalu toteutetaan?
2. Mitkä ovat Koutalaen alueen energian käytön profiilit?
3. Minkälainen Koutalaen hybridienergiaratkaisun tulisi olla?

Kaikki kolme edellä mainituista tutkimuskysymyksistä ovat suhteellisen laajoja ja kukin niistä sisältää useita tarkempia näkökulmia ja kysymyksiä. Tässä kohtaa tutkimuskysymysten sisältöön ei kuitenkaan paneuduta sen enempää, vaan tyydytään vain tiedostamaan tutkimuskysymysten laajuus. Tarkemmin tähän työhön sisällytettyjä näkökulmia käydään läpi seuraavassa, tutkimuksen rajauksia käsittelevässä luvussa.

## 1.4 Tutkimusmenetelmä ja rajaukset

Tämän tutkimuksen puitteissa on tarkoitus keskittyä Levin Koutalaen vapaa-ajan keskuksen alueellisen hybridienergiajärjestelmän analysointiin kokonaisuutena. Työn lopputuloksena pyritään löytämään päätöksentekoa ohjaavaa tietoa energiajärjestelmään ja sen mitoittamiseen liittyen. Käytännössä tämän tavoitteen saavuttaminen tarkoittaa alueellisten energian tuotantolaitosten tehokokoluokkien ja käyttöjärjestyksen analysointia. Tämän lisäksi järjestelmälle halutaan laskea kustannusarvio. Järjestelmän tarkkoja mitoittustietoja ei anneta, vaan lopputuloksen on pikemminkin tarkoitus toimia lähtökohtana yksityiskohtaiselle suunnittelulle. Tarkoituksena ei ole myöskään optimoida Koutalalle tulevan rakennuskannan energiatehokkuutta tai sen energiataloudellisia ratkaisuja. Työssä suoritetaan kuitenkin Koutalalle tulevan ja siellä jo olemassa olevan rakennuskannan energiaprofiilien arviointi, sillä ne toimivat lähtötietona varsinaisen energiajärjestelmän analyysille.

Tutkimukseen sisältyy analyysimenetelmän ja Microsoft Excel -pohjaisen laskentatyökalun kehittäminen alueellisten hybridienergiajärjestelmien tarkasteluun. Työn aikana kehitetty laskentatyökalu sisältää yksinkertaistetun menetelmän alueen rakennusten energiaprofiilien arviointiin sekä mahdollisuuden tuoda tieto energiaprofiileista työkalun ulkopuolelta. Lisäksi työkalulla voidaan analysoida hybridienergiajärjestelmän mitoituksen kokoluokkia sekä arvioida erilaisten toteutusten vaikutusta koko järjestelmän energiavirtoihin ja elinkaarikustannuksiin. Työkalu pyritään kehittämään sellaiseksi, että se olisi hyödynnettävissä myös muissa samantapaisissa hankkeissa. Yhteenvetona voidaan sanoa, että tässä tutkimuksen pääpaino on alueellisiin hybridienergiaratkaisuihin soveltuvan analyysimenetelmän ja laskentatyökalun kehittämisessä, minkä jälkeen menetelmän toimivuus todennetaan analysoimalla sillä Koutalaen hybridienergiajärjestelmää.

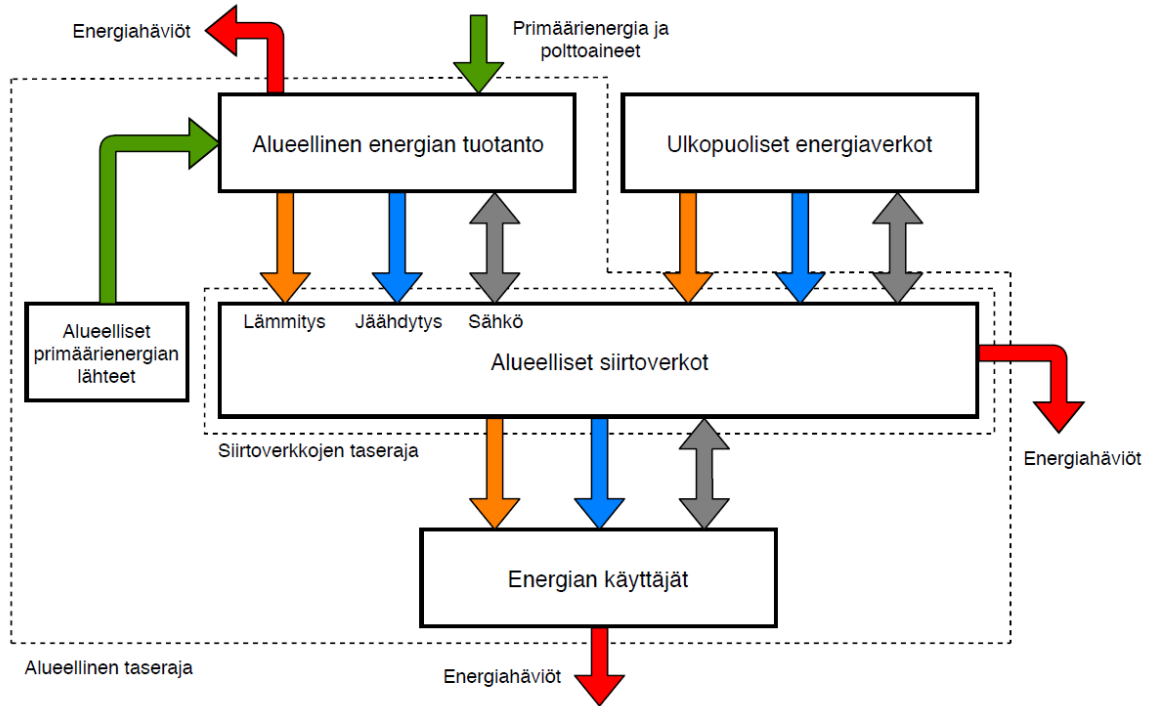
## 2 Alueellinen hybridienergiajärjestelmä

Alueellisella energiajärjestelmällä tarkoitetaan tämän työn piirissä sellaista energian tuotannon ja jakelun systeemiä, joka palvelee tietyille pienehkölle alueelle keskittyneitä kuluttajia. Hybridienergiajärjestelmä on puolestaan systeemi, joka hyödyntää kahta tai useampaa energian lähdettä tuotannossaan. Alueellinen hybridienergiajärjestelmä on luonnollisesti näiden kahden yhdistelmä, eli tiettyä aluetta palveleva energiajärjestelmä, jossa hyödynnetään useaa energian lähdettä paikallisessa tuotannossa. Alueellisissa hybridienergiajärjestelmissä eri energiamuotojen, ja sen eri komponenttien väliset vuorovaikutukset voidaan määrittää tarkemmin, kuin perinteisissä energiajärjestelmissä ja siten parantaa energiatehokkuutta sekä vähentää ympäristölle haitallisia päästöjä (Mancarella 2014). Tämä edellyttää kuitenkin järjestelmän hyvää ja tarkkaa suunnittelua. Seuraavaksi käydäänkin läpi alueellisen hybridienergiaratkaisun analysoinnin ja suunnittelun kannalta tärkeimpiä periaatteita ja taustatietoja

### 2.1 Alueellisen energiajärjestelmän rakenne ja taseet

Alueelliseen hybridienergiajärjestelmään liittyvät tarkastelut aloitetaan nyt määrittämällä lähtökohdat tässä työssä suoritettavalle analyysille. Viholainen et al. (2016) esittävät viitekehyksen alueellisen energiatehokkuuden analysointiin, jonka periaatteita noudatetaan myös tässä tutkimuksessa, joskin hiukan soveltaen. Viitekehys on suhteellisen yleispätevä tietyn alueen sisäisten energiavirtojen ja toimijoiden välisten vuorovaikutusten tarkasteluun. Lisäksi siinä huomioidaan myös vuorovaikutus ulkoisten toimijoiden kanssa, mikä on myös tämän työn kannalta tarpeellista.

Viholaisen et al. (2016) esittämän viitekehyksen mukaan alueellinen energiajärjestelmä jaetaan nyt kolmeen pääkomponenttiin: paikalliseen energian tuotantoon, alueellisiin energian siirtoverkkoihin ja energian käyttäjiin. Tämän lisäksi alueellinen järjestelmä voi olla vuorovaikutuksessa ulkopuolisten energiaverkkojen kanssa, joista tuodaan energiaa sisään alueelliseen järjestelmään tai mahdollisesti toimitetaan sitä myös ulospäin verkkoon. Paikallisen energian tuotannon avulla voidaan hyödyntää sekä alueen sisäpuolelta, että ulkopuolelta löytyviä primäärienergian lähteitä ja polttoaineita. Primäärienergialla tarkoitetaan tässä tapauksessa jalostamattomassa muodossa olevaa energiaa. Primäärienergian ja polttoaineiden lisäksi tässä työssä tarkastellaan myös sähkön, lämmityksen ja jäähdytyksen energiavirtoja. Alueen ulkopuolelta hankittu tai paikallisilla laitoksilla tuotettu energia toimitetaan alueellisia siirtoverkkoja pitkin energian käyttäjille. (Viholainen et al. 2016) Käytön seurauksena energia muuttuu muotoaan siten, ettei se enää ole hyödynnettävissä, jolloin sen katsotaan poistuvan alueellisesta taseesta energiahäviöinä. Samalla periaatteella energiahäviöitä tapahtuu myös tuotannossa ja energian siirrossa. Yleisessä tilanteessa energian käyttäjät voivat olla esimerkiksi rakennuksia, teollisia prosesseja tai liikennettä. Tässä työssä keskitytään kuitenkin rakennuksiin energian käyttäjinä.



Kuva 1. Alueellisen energiajärjestelmän rakenne, energiavirrat ja taserajat.

Tässä työssä käytetty alueellisen energiajärjestelmän perusrakenne sekä siihen liittyvät energiavirrat ja taserajat on esitetty kuvassa 1. Alueellinen taseraja on esitetty järjestelmään tulevien ja siitä poistuvien energiavirtojen havainnollistamiseksi, mutta tässä työssä sitä ei varsinaisesti käsitellä laskennallisesti. Sen sijaan alueellisten siirtoverkkojen energiataseiden laskennallinen tarkastelu on tässä työssä kehitetyn analyysimenetelmän ja laskentatyökalun kannalta tärkeää. Yhtälö 1 kuvaa alueellisen siirtoverkon energiataseyhtälöä tasapainotilassa.

$$\dot{E}_{tuotanto} + \dot{E}_{osto} = \dot{E}_{tarve} + \dot{E}_{häviöt} \quad (1)$$

jossa  $\dot{E}_{tuotanto}$  on energian tuotannon teho [W]  
 $\dot{E}_{osto}$  on ulkopuolisesta energiaverkosta otettu teho [W]  
 $\dot{E}_{tarve}$  on alueen energian tehontarve [W]  
 $\dot{E}_{häviö}$  on siirtoverkossa tapahtuva tehohäviö [W]

Siirtoverkossa tapahtuvat häviöt otetaan nyt huomioon häviökertoimen  $k_{häviö}$  avulla, joka oletetaan vakioksi. Häviökertoimen lukuarvo on välillä 0 – 1. Häviöt lasketaan osuutena kaikesta alueelliseen siirtoverkkoon syötetystä energiasta. Tällöin siirtoverkon energiataseyhtälö voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon.

$$\dot{E}_{tuotanto} + \dot{E}_{osto} - \frac{\dot{E}_{tarve}}{1 - k_{häviö}} = 0 \quad (2)$$

Yhtälöä 2 käytetään perustana tässä työssä suoritettavissa alueellisten siirtoverkkojen laskelmissa. Kuvasta 1 nähdään myös tässä työssä oletetut energiavirtojen suunnat. Lämmityksen ja jäähdytyksen energiavirrat voivat liikkua vain yhteen suuntaan, tuotannosta kohti käyttäjiä. Sähkö sen sijaan voi näissä tarkasteluissa liikkua järjestelmässä kahteen suuntaan ja sitä voidaan toimittaa myös alueen ulkopuolelle.

Eräs alueellisissa hybridienergiajärjestelmissä esiintyvä komponentti, joka tässä tutkimuksessa on jätetty huomioimatta, on energian pitkäaikainen varastointi. Sen avulla pystyttäisiin leikkaamaan energian tuotannon huippukuormaa purkamalla varastoa huipputehon tarpeen aikana ja lataamalla sitä vähäisen tehon tarpeen aikana. Erityisen hyödylliseksi pitkäaikainen energian varastointi voi osoittautua järjestelmissä, jossa hyödynnetään suurissa määrin epäsäännöllisiä uusiutuvia energian lähteitä, kuten aurinkoenergiaa. Toisaalta energian pitkäaikaisen varastoinnin kannattavuus vaihtelee tapauskohtaisesti ja järjestelmän muista teknisistä ratkaisuista riippuen. Jos esimerkiksi helposti säädettävää tuotantokapasiteettia on olemassa, voi pitkäaikaiseen energian varastointiin investoiminen olla kannattamatonta. (Gabrielli et al. 2018)

## 2.2 Alueellisen energiajärjestelmän suunnittelu

Alueellisten hybridienergiajärjestelmien suunnittelu on usein monimutkainen tehtävä, jota voidaan lähestyä monista erilaisista näkökulmista. Yleisesti tällainen järjestelmä on perusteltu, mikäli sen avulla saavutetaan parempi suorituskky perinteiseen järjestelmään verrattuna. Pääsääntöisesti alueellisten hybridienergiajärjestelmien suorituskkyä mitataan joko energiatehokkuuden, ympäristövaikutusten tai taloudellisuuden näkökulmista. Jokaiselle näistä on kehitetty useita indikaattoreita, joiden perusteella järjestelmien suorituskkyä voidaan arvioida. Esimerkiksi energiatehokkuuden näkökulman indikaattorit voivat olla järjestelmään sisään tulevien ja siitä saatavien hyödyllisten energiavirtojen avulla määritettyjä hyötysuhteita. Ympäristövaikutusten indikaattorit liittyvät usein päästöihin, kuten hiilidioksidiin, rikkidioksidiin tai lukuisiin muihin yhdisteisiin. Taloudellisen näkökulman yleisimpiä indikaattoreita ovat käyttökustannukset ja elinkaarikustannukset. Suorituskvyn indikaattorit valitaan usein kuitenkin tapauskohtaisesti, minkä lisäksi edellä mainitun kolmen eri kategorian indikaattoreita tyypillisesti myös yhdistellään. (Mancarella 2014)

Esimerkiksi tässä tutkimuksessa analyysit suoritetaan teknistaloudellisin perustein, mikä tarkoittaa energiatehokkuuden ja taloudellisen näkökulman yhdistämistä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että energiajärjestelmän teknistä toimivuutta analysoidaan sen komponenttien välillä esiintyvien energiavirtojen perusteella, kun taas taloudellisten analyysien indikaattoreiksi valitaan elinkaarikustannukset ja elinkaaren aikaista energian ominaishintaa (LCOE, levelized cost of energy). Energian ominaishinta lasketaan elinkaarikustannusten ja elinkaaren aikana tuotetun energian osamääränä, eli yhtälön 3 mukaan (Luna-Rubio et al. 2012). Tässä työssä sitä käytetään lähinnä eri tuotantoyksiköiden keskinäiseen vertailuun.

$$LCOE = \frac{P}{nE_{tuotto}} \quad (3)$$

jossa  $P$  on järjestelmän elinkaarikustannusten nykyarvo [€]  
 $E_{tuotto}$  on järjestelmän tuottaman energian vuotuinen määrä [J]  
 $n$  on tarkasteluajan pituus [a]

Alueellisten hybridienergiajärjestelmien suunnitteluun liittyviä lähtökohtia ja tavoitteita on käsitelty useissa lähteissä, joita käydään seuraavaksi läpi. Esimerkiksi Luna-Rubio et al. (2012) sekä Fathima & Palanisamy (2015) tarkastelevat pelkästään sähköä tuottavia hybridienergiajärjestelmiä, mutta niissä esitetyt suunnitteluperiaatteet pätevät myös useita energiamuotoja hyödyntäviin järjestelmiin. Usean energiamuodon alueellisia energiajärjestelmiä on puolestaan käsitelty muun muassa lähteissä Mancarella (2014), Gu et al. (2014), Gabrielli et al. (2018) sekä Li & Xu (2018). Yleisenä teemana näissä on

optimaalisen ratkaisun etsiminen useiden mahdollisten vaihtoehtojen joukosta. Tämä tekee alueellisten hybridienergiajärjestelmien suunnittelusta siis myös optimointiongelman.

Alueellisten hybridienergiajärjestelmien suorituskykyyn eniten vaikuttavat seikat liittyvät järjestelmän energian tuotannon mitoittamiseen. Järjestelmän kokonaistehon mitoituksen lisäksi tehokkuuteen vaikuttavat tuotantolaitosten keskinäiset mitoitus-suhteet sekä niiden käyttöstrategia. Luonnollisesti myös energian tuotannon menetelmien valinnoilla on osuus järjestelmän suorituskykyyn. Kokonaisuudessaan tuotantokapasiteetti tulisi mitoittaa mahdollisimman tarkkaan energian tarpeiden perusteella. Alueellisissa energiajärjestelmissä tämä pystytään tyypillisesti tekemään tarkemmin, kuin perinteisissä energiajärjestelmissä. Toisaalta energian tuotannon toimintavarmuus tulee myös taata, joten järjestelmässä tulee olla myös tuotannon varakapasiteettia mahdollisten vikatilanteiden ja huoltojen varalta. (Gu et al. 2014, Fathima & Palanisamy 2015)

Hybridienergiajärjestelmissä energian tuotannon käyttöstrategia vaikuttaa suorituskykyyn ja joissain tapauksissa myös tuotantolaitosten mitoittamiseen (Gu et al. 2014, Fathima & Palanisamy 2015). Esimerkkinä voidaan mainita maalämpö, jonka lämmönkeruupiiri täytyy mitoittaa siitä otetun energian mukaan (Chiasson 2016, s. 55-80). Tähän energiamäärään puolestaan vaikuttaa maalämmön käyttöaste ja siten myös koko tuotantojärjestelmän käyttöstrategia. Tuotantoyksiköiden käyttöjärjestyksen vaikutus suorituskykyyn riippuu asetetuista tavoitteista ja valituista indikaattoreista. Esimerkiksi teknistaloudellisesta näkökulmasta katsottuna ensimmäisenä kannattaa käyttää sellaista tuotantoa, jolla on alhaiset käyttökustannukset, kun taas huipputuotannossa vaaditaan alhainen investointikustannus, mutta sallitaan korkeammat käyttökustannukset. Tuotannon älykkäällä ohjauksella voidaan puolestaan saavuttaa edelleen parannuksia järjestelmän suorituskyvyssä (Li & Xu 2018). Näin ollen energian tuotannon käyttöjärjestykseen ja ohjaukseen liittyvät seikat tulisi myös ottaa huomioon jo järjestelmän suunnittelussa aina, kun se on mahdollista.

Energian siirtoverkkojen suunnittelun perusteisiin ei tämän tutkimuksen piirissä juurikaan perehdytä. Lämmitys- ja jäähdytysenergian siirtoverkkojen lämpötilatasojen osalta on kuitenkin syytä sanoa muutama sana, sillä ne vaikuttavat järjestelmän tehokkuuteen niin energian tuotannon, kuin siirronkin osalta. Esimerkiksi lämmitysverkoston siirtohäviöt pienenevät, kun siinä virtaavan nesteen lämpötilatasoa alennetaan. Tämän tutkimuksen kannalta tärkeämpää on kuitenkin verkostolämpötilojen vaikutus useiden lämmöntuotannon menetelmien tehokkuuteen. Näistä esimerkkeinä voidaan mainita lämpöpumput ja aurinkolämpö, jotka toimivat tehokkaammin alhaisilla verkostolämpötiloilla. Toisaalta lämpötilatasojen alentamista rajoittavat energian käyttäjien vaatimat lämpötilatasot, jotka tulee vähintään täyttää. Rakennusten tapauksessa minimilämpötilaa rajoittaa joko sen lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila tai lämpimän käyttöveden minimilämpötila. (Averfalk & Werner 2018) Jäähdytysverkostoissa puolestaan korkeampi lämpötilataso on matalaa parempi. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä lähempänä siirtoverkon nestekierron lämpötilatasot ovat energian tarpeiden vaatimia ääriarvoja, sen parempi se on energiatehokkuuden kannalta.

Usein alueellisten energiaratkaisujen suunnittelun tavoitteena on löytää tilanteeseen sopivin ratkaisu useiden vaihtoehtojen joukosta, jolloin kyseessä on optimointiongelma. Yleensä alueellisten hybridienergiajärjestelmien optimoinnin tavoitteena on löytää energian tuotantomuotojen optimaalinen kombinaatio ja mitoittukset. Tämän lisäksi optimointiin voidaan ottaa toinenkin näkökulma. Joskus voi olla tarpeellista määrittää järjestelmälle optimaalinen ohjauksen strategia esimerkiksi vuotuisten käyttökustannusten

minimoimiseksi. Li & Xu (2018) osoittivat, että energian tuotannon ohjauksen strategian optimoinnilla järjestelmän käyttöä on mahdollista tehostaa merkittävästi ja saavuttaa siten säästöjä myös käyttökustannuksissa. Näiden kahden edellä mainitun optimointinäkökulman yhdistäminen jo suunnitteluvaiheessa voi tuottaa edelleen parannuksia järjestelmän suorituskyvyssä. Tällaiset tarkastelut ovat käytännössä haastavia, mutta esimerkkejä näistäkin on olemassa. Gabrielli et al. (2018) suorittivat tuotannon mitoituksen sekä käyttöstrategian optimoinnin alueelliselle hybridienergiajärjestelmälle ja raportoivat merkittävän potentiaalin vuotuisten kustannusten sekä ympäristölle haitallisten päästöjen pienentämiseen perinteisiin järjestelmiin verrattuna. Rivarolo et al. (2016) suorittivat puolestaan teknistaloudellisen optimoinnin energian tuotannon tehomitoituksille ja käyttöstrategialle useille erilaisille kokoonpanoille. Heidän analyyseissään kaikki optimoidut vaihtoehdot todettiin taloudellisesti kannattaviksi hankkeiksi.



### 3 Rakennusten energian käytön ennakointi

Tämän työn tarkasteluissa alueellisen energiajärjestelmän pääasiallisia energian käyttäjiä ovat rakennukset ja järjestelmän muiden komponenttien, kuten tuotantolaitosten mitoitus määritetään niiden energian tarpeiden perusteella. Näin ollen alueelliseen järjestelmään liitettävien rakennusten energian käytön arviointi on keskeinen tehtävä tässä työssä suoritettavassa analyysissä. Olemassa olevien rakennusten energian käyttö voidaan usein määrittää mittaustietojen perusteella, mutta uusien, vasta suunnitteluvaiheessa olevien rakennusten energian käyttö täytyy laskea etukäteen. Rakennusten energian käytön ennakointi on olennainen ja yleisesti suoritettava osa niiden suunnittelua, minkä seurauksena siihen on kehitetty useita menetelmiä. Seuraavaksi käydään läpi rakennusten energian käytön ennakointiin liittyvää taustatietoa sekä esitetään tässä työssä käytetty energian käytön laskentamenetelmä.

#### 3.1 Rakennuksen energiatase

Energian käytön ennakkoinnin kannalta on tärkeää ymmärtää rakennuksissa esiintyviä energiavirtoja sekä niiden vuorovaikutuksia. Tilanteesta riippuen rakennuksiin täytyy tuoda lämmitys-, jäähdytys- ja sähköenergiaa, minkä lisäksi rakennukseen voi tulla energiaa erilaisten lämpökuormien sekä ilmaisen energian lähteiden kautta. Energiaa poistuu rakennuksesta lämpöhäviöiden ja sähkölaitteiden energian käytön myötä. Näitä energiavirtoja voidaan tarkastella rakennuksen energiataseen avulla.

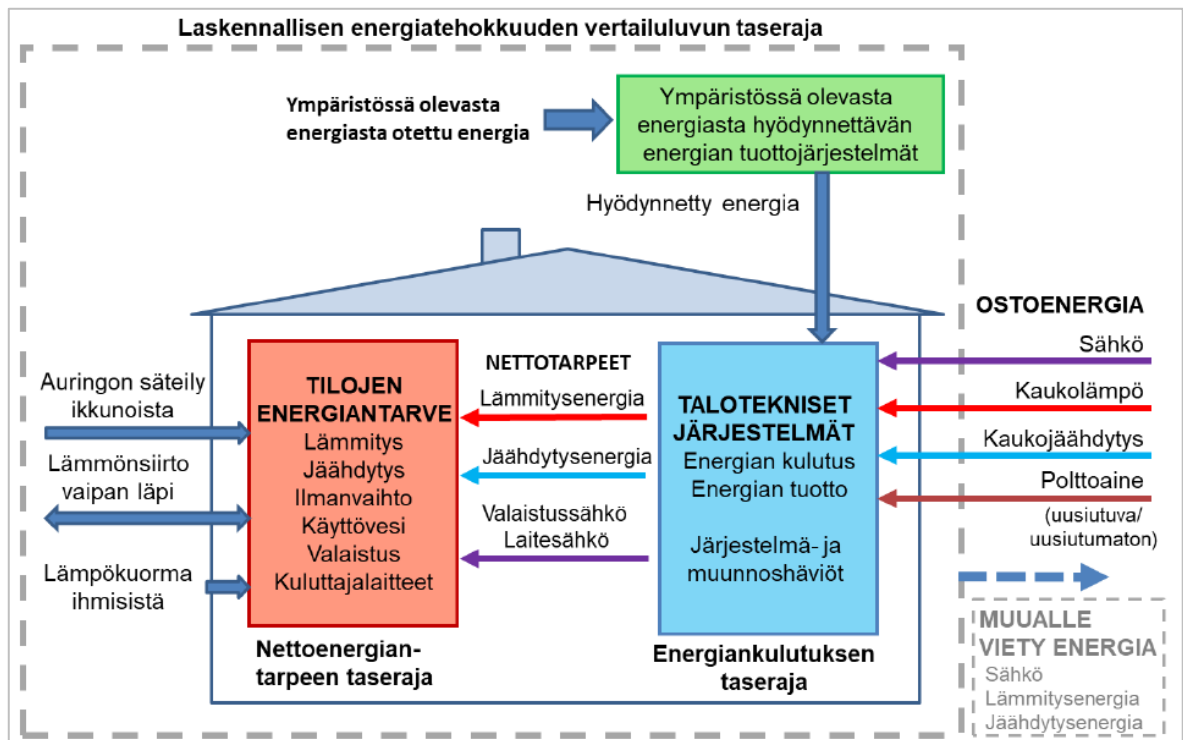
Ympäristöministeriön (2018b) laatiman rakennusten energian käytön laskentaohjeen mukaan rakennuksen energian kokonaistarve koostuu tilojen lämmitys- ja jäähdytystarpeesta, ilmanvaihdon lämmitys- ja jäähdytystarpeesta, käyttöveden lämmitystarpeesta, taloteknisten järjestelmien sähköenergian tarpeesta, valaistuksen sähköenergian tarpeesta ja kuluttajalaitteiden sähköenergian tarpeesta. Energian kokonaistarve kuvaa rakennukseen ulkopuolelta tuotavan energian määrää, joka voi olla ostoenergiaa tai paikallisista uusiutuvista lähteistä tuotettua energiaa. Yhtälönä energian tarve voidaan ilmaista seuraavassa muodossa.

$$E_{tarve} = Q_{lämmitys,tilat} + Q_{lämmitys,iv} + Q_{lämmitys,lkv} + Q_{jäähdytys,tilat} + Q_{jäähdytys,iv} + W_{tate} + W_{valaistus} + W_{laitteet} \quad (4)$$

Tässä  $W_{tate}$  sisältää rakennuksen taloteknisten järjestelmien sähköntarpeen. Taloteknisiä järjestelmiä ovat muun muassa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät sekä ilmanvaihtojärjestelmät. Yhtälön 4 energiamäärät voidaan laskea menetelmästä riippuen eri tavoilla, mutta yleisesti niihin vaikuttaa aina samat tekijät. Esimerkiksi tilojen lämmitykseen tai jäähdytykseen tarvittavan energian määrä on riippuvainen rakennusvaipan läpi tapahtuvasta lämmönsiirrosta, tilassa tapahtuvan tulo-, vuoto- ja korvausilman lämpenemisen tai jäähtymisen tarvitsemasta lämpöenergiasta, tiloissa vaikuttavista lämpökuormista sekä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien hyötysuhteista (Ympäristöministeriö 2018b). Energian tarpeiden laskennallisiin menetelmiin perehdytään myöhemmin tässä luvussa, jolloin esitetään myös tässä työssä kehitetyssä laskentatyökalussa käytetty energialaskentamenetelmä.

Kuvassa 2 on esitetty Ympäristöministeriön (2018b) ohjeen mukainen rakennuksen energiatase ja eri taserajojen määrittelyt. Energian nettotarpeet kuvaavat niitä energiamääriä, jotka tarvitaan tilojen olosuhteiden ylläpitämiseen ja eivät näin ollen ota huomioon teknisissä

järjestelmissä tapahtuvia häviöitä. Kun järjestelmä- ja muunnoshäviöt otetaan huomioon, päästään käsiksi energian käytön määriin. Tämän jälkeen voidaan tarkastelussa ottaa vielä huomioon rakennuksen teknisillä järjestelmillä ympäristöstä paikallisesti hyödynnetty energia, jolloin voidaan laskea tarvittava ostoenergian määrä. (Ympäristöministeriö 2018b) Ympäristöstä hyödynnettävää energiaa voi olla esimerkiksi aurinkopaneeleilla tuotettu sähköenergia tai aurinkokeräimillä tuotettu lämpöenergia. Alueellisen energiajärjestelmän suunnittelun näkökulmasta halutaan selvittää rakennuskannan ostoenergian tarpeet, joihin pyritään vastaamaan alueellisessa järjestelmässä tuotetulla energialla ja mahdollisesti myös alueen ulkopuolisista verkoista ostetulla energialla.



Kuva 2. Rakennuksen energiatase ja taserajat (Ympäristöministeriö 2018b).

### 3.2 Energian tarpeen simulointi

Yleisesti rakennusten energian käyttöä pyritään ennakoimaan mallintamalla siihen vaikuttavia tekijöitä laskennallisesti. Tätä prosessia kutsutaan usein rakennusten energiasimuloinniksi ja siihen on olemassa useita erilaisia lähestymistapoja. Tässä luvussa esitellään lyhyesti simulointiin yleisesti käytössä olevia lähestymistapoja. Rakennusten energiasimuloinnin menetelmät voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: tilastollisiin menetelmiin, fysikaalisiin menetelmiin ja hybridimenetelmiin. Tilastolliset menetelmät perustuvat niemensä mukaisesti rakennuksista kerättyyn historialliseen tilastotietoon. Tällaiset menetelmät voivat perustua yksinkertaisimmillaan tarkasteltavien muuttujien ja tilastotietojen välisten riippuvuuksien etsimiseen. Edistyneemmät menetelmät puolestaan hyödyntävät usein tekoälyn ja koneoppimisen mukanaan tuomia mahdollisuuksia. (Fumo 2014, Fouquier et al. 2013)

Fysikaaliset menetelmät perustuvat puolestaan rakennuksen energian tarpeeseen vaikuttavien luonnonilmiöiden matemaattiseen mallintamiseen tunnettujen fysiikan periaatteiden ja lakien avulla. Kuten tilastollisten menetelmien tapauksessa, fysikaalisten simulointimenetelmien tarkkuustaso voidaan valita usealla eri tavalla sovelluskohteesta ja

tavoitteista riippuen. Näiden menetelmien tarkkuustaso voi vaihdella esimerkiksi hyvin yksityiskohtaisesta CFD-laskennasta aina yksinkertaisiin solmupistemalleihin saakka. Rakennuksessa esiintyvien fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen perustuvat simulointimenetelmät ovat olleet jo pitkään suosittuja rakennusten suunnittelutyössä, minkä seurauksena siihen tarkoitettuja kaupallisia simulointiohjelmia on runsaasti saatavilla. (Fouquier et al. 2013)

Energiasimuloinnin menetelmien kolmas kategoria, hybridimenetelmät, käsittää sellaiset lähestymistavat, jotka yhdistävät piirteitä ja toimintatapoja sekä tilastollista, että fysikaalisista menetelmistä. Tyypillinen esimerkki hybridimenetelmästä on tapaus, jossa varsinainen rakennuksen energian tarve simuloidaan jollain fysikaalisella menetelmällä ja tilastollista menetelmää käytetään simuloinnin parametrien optimaalisten arvojen etsimiseen. Hybridimenetelmillä pyritään lähtökohtaisesti yhdistämään tilastollisten ja fysikaalisten menetelmien hyödyt. (Fumo 2014, Fouquier et al. 2013)

### **3.3 Yksinkertaistettu energian tarpeen dynaaminen laskenta**

Tässä työssä toteutetaan rakennusten energian käytön arvioimiseen tarkoitettu yksinkertaistettu dynaaminen laskentamenetelmä, jolla voidaan laskea energian nettotarpeet tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykselle ja jäähdytykselle sekä käyttöveden lämmitykselle. Lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeiden lisäksi voidaan laskea myös sähköenergian nettotarve. Nettotarpeiden perusteella voidaan puolestaan määrittää rakennuksen ostoenergian tarpeet, kun huomioidaan rakennuksen teknisille järjestelmille määritetyt hyötysuhteet. Kaikki menetelmään liittyvät laskentavaiheet suoritetaan tässä tapauksessa tunnin aika-askeleella vuoden pituisen jakson yli. Lopputuloksena saadaan rakennukselle ominaiset tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksen, tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytyksen, sekä sähkön käytön tuntikohtaiset profiilit. Menetelmällä laskettuja tuloksia voidaan hyödyntää myöhemmin alueellisen energiarjestelmän kuormia analysoitaessa.

Tilaan tuotavan lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeen laskenta perustuu tässä tapauksessa lämmönsiirron ilmiöiden sekä sähköisten resistanssien ja kapasitanssien väliseen analogiaan. Laskentamalli perustuu Sirénin (2015a) esittämään menetelmään, joka on samankaltainen SFS-EN ISO 13790 –standardissa (2008) esitettyyn dynaamiseen tuntitason energialaskentamenetelmään verrattuna, sisältäen kuitenkin joitakin eroavaisuuksia. Standardi SFS-EN ISO 13790 on tämän tutkimuksen tekohetkellä jo kumottu ja korvattu uudella standardilla, mutta siinä esitetyt laskentaperiaatteet sopivat siitä huolimatta hyvin tämän tutkimuksen tarpeisiin tietyin muutoksin. Tässä osiossa esitellään kehitetyn laskentamenetelmän periaatteet ja perusyhtälöt sekä laskennan yleinen eteneminen.

#### **3.3.1 Solmupistemalli ja lämpötaseyhtälöt**

Sirénin (2015a) esittämässä laskentamenettelyssä rakennuksessa tapahtuvat lämmönsiirron ilmiöt mallinnetaan solmupisteiden, lämpövirtojen siirtymäreittejä kuvaavien lämpökonduktanssien sekä rakennuksessa vaikuttavien lämpökapasiteettien avulla. Konduktanssit ovat verrattavissa sähköisiin resistansseihin, kun taas lämpökapasiteetit ovat analogisia sähköisten kapasitanssien kanssa. Solmupisteiden avulla puolestaan kuvataan tarkastelussa olennaisia lämpötiloja. Tässä tapauksessa käytetty malli on esitetty kuvassa 3, jossa solmupisteitä on neljä: ulkoilman lämpötilasolmupiste  $T_u$ , sisäilman lämpötilasolmupiste  $T_i$ , rakenteiden lämpötilasolmupiste  $T_{rak}$  sekä tuloilman lämpötilasolmupiste  $T_{ti}$ . Nyt koko rakennus siis käsitellään yhtenä ilmatilana, jossa vallitsee homogeeniset termodynaamiset

olosuhteet. Lisäksi koko rakennusmassan oletetaan olevan yhtenäisessä lämpötilassa. Rakennuksen lämpökapasiteetti mallinnetaan yhdellä kapasitanssilla  $C_{rak}$ , joka on liitoksissa rakenteiden lämpötilaa kuvaavaan solmupisteeseen.

Solmupisteiden väliset vuorovaikutukset kuvataan lämmönsiirron konduktanssien ja lämpökapasiteettivirtojen avulla. Nämä ovat koneellisen ilmanvaihdon (toisin sanoen tuloilman) lämpökapasiteettivirta  $H_{ti}$ , vuoto- ja korvausilman lämpökapasiteettivirta  $H_{vi}$ , ikkunoiden konduktanssi  $H_{ikk}$ , muiden rakenteiden konduktanssi  $H_{rak}$  sekä rakennesolmupisteen ja ilmasolmupisteen välinen konduktanssi  $H_i$ . Rakennesolmupisteeseen kohdistuu lämpökuorma  $\dot{Q}_{rak}$  ja ilmasolmupisteeseen kohdistuu lämpökuorma  $\dot{Q}_i$ . Tilaan tuotava lämmitys- tai jäähdytysteho  $\dot{Q}_{lj}$  kohdistuu ilmasolmupisteeseen. (Sirén 2015a) Tässä tutkimuksessa käytettävä solmupistemalli eroaa SFS-EN ISO 13790 –standardissa (2008) esitetystä mallista muutamalla merkittävällä tavalla. Ensinnäkin ISO 13790:n mallissa on yksi solmupiste enemmän, jonka avulla kuvataan rakenteiden sisäpintojen keskimääräistä lämpötilaa. Tämä solmupiste on yhdistetty konduktansseilla ilmasolmupisteeseen ja rakennesolmupisteeseen sekä ikkunoiden konduktanssilla ulkoilman solmupisteeseen. Lisäksi ISO 13790:n mallissa ei ole eritelty tuloilman ja vuotoilman lämpökapasiteettivirtoja.

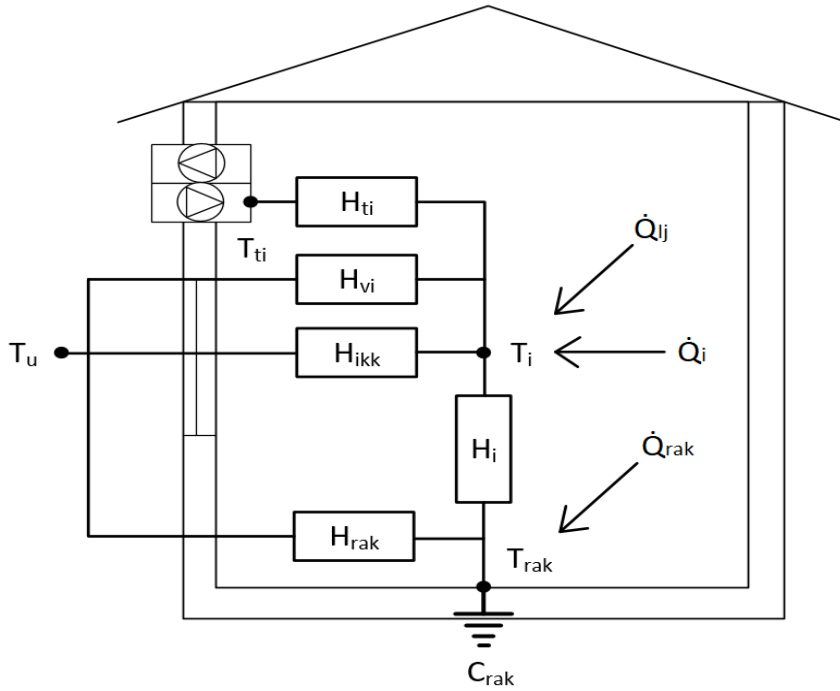
Energian tarpeen laskenta Sirénin (2015a) esittämän solmupistemallin avulla perustuu rakenne- ja ilmasolmupisteiden lämpötaseyhtälöiden ratkaisemiseen. Ilmasolmupisteelle saadaan seuraava lämpötaseyhtälö.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = H_{ti}(T_{ti} - T_i) + (H_{vi} + H_{ikk})(T_u - T_i) + H_i(T_{rak} - T_i) + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{lj} \quad (5)$$

jossa  $C_i$  on ilman lämpökapasiteetti. Rakennesolmupisteelle puolestaan saadaan yhtälön 6 mukainen lämpötase.

$$C_{rak} \frac{dT_{rak}}{dt} = H_{rak}(T_u - T_{rak}) + H_i(T_i - T_{rak}) + \dot{Q}_{rak} \quad (6)$$

Näistä yhtälöistä voidaan sopivalla menettelyllä ratkaista solmupisteiden lämpötilat ja sitä kautta myös lämmitys- tai jäähdytystehon nettotarpeet. (Sirén 2015a)



Kuva 3. Rakennuksen lämmöntarpeen simuloinnin solmupistemalli (mukaillen Sirén 2015a).

### 3.3.2 Differenssimenetelmä

Yhtälöistä 5 ja 6 huomaamme, että ilma- ja rakennesolmupisteiden lämpötaseet ovat differentiaaliyhtälöitä, jotka tässä tapauksessa ratkaistaan numeerisesti. Ratkaisussa hyödynnetään niin kutsuttua differenssimenetelmää, jossa derivaattatermi (tässä tapauksessa lämpötilan aikaderivaatta), korvataan differenssitermillä. Derivaattatermin ja differenssitermin välinen yhteys on yhtälön 7 mukainen (Sirén 2015a).

$$\frac{dT^j}{dt} = \frac{T^j - T^{j-1}}{\Delta t} \quad (7)$$

jossa yläindeksi  $j$  kuvaa nykyistä ajan hetkeä ja  $j-1$  edellistä ajanhetkeä, kun taas  $\Delta t$  on aika-askeleen pituus. Yllä oleva yhtälö voidaan kirjoittaa vielä seuraavaan muotoon, kun halutaan ratkaista yhtälöstä lämpötila nykyisellä ajan hetkellä.

$$T^j = T^{j-1} + \frac{dT^j}{dt} \Delta t \quad (8)$$

Lämpötilan derivaattatermi voidaan nyt ratkaista aiemmin esitetyistä solmupisteiden lämpötaseista ja sijoittaa yhtälöön 8. Derivaattatermi voidaan valita vastaamaan joko nykyistä ajanhetkeä (yläindeksi  $j$ ), edellistä ajanhetkeä (yläindeksi  $j-1$ ) tai niiden yhdistelmää (Sirén 2015a). Tässä tutkimuksessa toteutettavassa laskentamenetelmässä lämpötilan derivaattatermi valitaan vastaamaan nykyhetkeä, jolloin kyseessä on niin sanottu implisiittinen menetelmä ja solmupisteiden lämpötaseyhtälöt voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon.

$$T_i^j = T_i^{j-1} + \frac{\Delta t}{C_i} [H_{ti}(T_{ti}^j - T_i^j) + (H_{vi} + H_{ikk})(T_u^j - T_i^j) + H_i(T_{rak}^j - T_i^j) + \dot{Q}_i^j + \dot{Q}_{lj}^j] \quad (9)$$

$$T_{rak}^j = T_{rak}^{j-1} + \frac{\Delta t}{C_{rak}} [H_{rak}(T_u^j - T_{rak}^j) + H_i(T_i^j - T_{rak}^j) + \dot{Q}_{rak}^j] \quad (10)$$

Tästä yhtälöparista voidaan nyt ratkaista ilmasolmupisteen ja rakennesolmupisteen lämpötilat, kun solmupisteiden lämpötilat edellisellä ajanhetkellä tunnetaan. Käytännössä yhtälöparista ratkaistaan ensin ilmasolmupisteen lämpötila ilman lämmitystä tai jäähdytystä, eli kun  $\dot{Q}_{lj} = 0$ . Mikäli saatu lukuarvo ei ole määriteltyjen minimi- ja maksimiarvojen välillä, asetetaan se toiseen niistä, riippuen siitä tarvitaanko lämmitystä vai jäähdytystä, ja ratkaistaan yhtälöistä  $\dot{Q}_{lj}$ . Kun tilaan tarvittava lämpöteho on ratkaistu, saadaan siitä laskentahetken aikainen keskimääräinen energiantarve kertomalla teho laskennan aika-askeleella. Kun ilmasolmupisteen lämpötila on tiedossa, voidaan ratkaista myös rakennesolmupisteen lämpötila. Laskennan tarkempi eteneminen esitetään osiossa 3.3.8.

### 3.3.3 Konduktanssit ja lämpökapasiteetit

Solmupisteiden välisten vuorovaikutusten selvittämiseksi täytyy määrittää niitä kuvaavat konduktanssit ja lämpökapasiteettivirrat. Lisäksi rakennuksen lämpödynaamisen käyttäytymisen mallintamiseksi tulee selvittää rakenteiden lämpökapasiteetin arvo. Tämän tutkimuksen yhteydessä edellä mainitut suureet määritetään jälleen Sirénin (2015a) esittämien periaatteiden mukaan. Rakennusvaipan osien, lukuun ottamatta ikkunoiden yhteen laskettu konduktanssi saadaan yksittäisten rakennusosien konduktanssien summana, yhtälön 11 mukaan.

$$H_{rak} = \sum_j H_{rak,j} = \sum_j U_{rak,j} A_{rak,j} \quad (11)$$

Ikkunoiden yhteenlaskettu konduktanssi saadaan samaan tapaan yksittäisten ikkunoiden konduktanssien summana.

$$H_{ikk} = \sum_j H_{ikk,j} = \sum_j U_{ikk,j} A_{ikk,j} \quad (12)$$

Näissä yhtälöissä  $U$  on rakennusosan  $U$ -arvo ja  $A$  on sen pinta-ala. Ilmasolmupisteen ja rakennesolmupisteen välinen konduktanssi määritetään puolestaan yhtälön 13 mukaan.

$$H_i = U_m A_m \quad (13)$$

jossa  $U_m$  on ilman ja rakenteiden välinen lämmönsiirtokerroin ja  $A_m$  on SFS-EN ISO 13790 standardissa (2008) määritelty tehollisen massan pinta-ala. Tässä tutkimuksessa tehollisen massan pinta-ala määritetään taulukon 1 mukaan, joka sisältyy myös ISO 13790 standardiin. Tuloilman sekä vuoto- ja korvausilman lämpökapasiteettivirrat lasketaan puolestaan niiden tilavuusvirtojen perusteella eli yhtälöiden 14 ja 15 mukaan.

$$H_{ti} = \dot{V}_{ti} \rho_i c_{p,i} \quad (14)$$

$$H_{vi} = \dot{V}_{vi} \rho_i c_{p,i} \quad (15)$$

joissa  $\dot{V}$  on ilman tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $\rho_i$  on virtaavan ilman tilavuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_{p,i}$  on virtaavan ilman ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ]

Yhtälössä 15 esiintyvän ilman tilavuusvirran  $\dot{V}_{vi}$  laskennassa otetaan nyt huomioon sekä tuulen ja lämpötila-erojen vaikutuksesta syntyvä vuotoilmavirta, että mahdollinen ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtojen erosta aiheutuva korvausilmavirta. Korvausilmavirta otetaan huomioon vain, jos ilmanvaihdon poistoilmavirta on tuloilmavirtaa suurempi. Yhtälönä tämä esitetään seuraavasti. (Ympäristöministeriö 2018)

$$\dot{V}_{vi} = \begin{cases} \frac{q_{50}}{3600 x} A_{vaippa} + k_{iv}(\dot{V}_{pi} - \dot{V}_{ti}), & \text{jos } \dot{V}_{pi} > \dot{V}_{ti} \\ \frac{q_{50}}{3600 x} A_{vaippa}, & \text{muuten} \end{cases} \quad (16)$$

jossa  $q_{50}$  on rakennusvaipan ilmanvuotoluku [ $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$ ]  
 $A_{vaippa}$  on rakennusvaipan pinta-ala, mukaan lukien alapohja [ $\text{m}^2$ ]  
 $x$  on kerroslukumäärän mukaan määritettävä kerroin [-]  
 $k_{iv}$  on ilmanvaihdon hetkellinen käyttökerroin [-]  
 $\dot{V}_{pi}$  on ilmanvaihdon poistoilmavirta mitoitusilanteessa [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $\dot{V}_{ti}$  on ilmanvaihdon tuloilmavirta mitoitusilanteessa [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Kertoimen  $x$  lukuarvo on 35 yksikerroksisille, 24 kaksikerroksisille, 20 kolmi- ja nelikerroksisille tai 15 viisikerroksisille tai sitä korkeammille rakennuksille (Ympäristöministeriö 2018). Rakennuksen sisältämän ilman lämpökapasiteetti  $C_i$  kuvaa sen kykyä varastoida lämpöä ja se lasketaan ilman ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden, sekä rakennuksen lämmitettyjen tilojen ilmatilavuuden  $V_f$  tulona eli yhtälön 17 mukaan. Ilman ominaislämpökapasiteetille ja tiheydelle käytetään tässä laskentamenetelmässä kuivan ilman lukuarvoja.

$$C_i = c_{pi} \rho_i V_f \quad (17)$$

Rakennuksen tehollinen lämpökapasiteetti  $C_{rak}$  kuvaa puolestaan sitä, kuinka paljon rakenteet kykenevät varastoimaan lämpöenergiaa. Tämän työn yhteydessä se määritetään rakenteiden tyypin sekä SFS-EN ISO 13790 –standardista (2008) löytyvän taulukon (taulukko 1) mukaan, johon myös Sirén (2015a) viittaa. Taulukossa symboli  $A_f$  tarkoittaa tarkasteltavan tilan lämmitettyä pinta-alaa.

*Taulukko 1. Tehollisen massan pinta-ala ja lämpökapasiteetti (SFS-EN ISO 13790).*

Rakennetyyppi	$A_m$ [ $\text{m}^2$ ]	$C_{rak}$ [J/K]
Hyvin kevytrakenteinen	$2,5 \times A_f$	$80000 \times A_f$
Kevytrakenteinen	$2,5 \times A_f$	$110000 \times A_f$
Keskiraskas	$2,5 \times A_f$	$165000 \times A_f$
Raskasrakenteinen	$3,0 \times A_f$	$260000 \times A_f$
Hyvin raskasrakenteinen	$3,5 \times A_f$	$370000 \times A_f$

### 3.3.4 Lämpökuormat

Rakennuksen sisäisiin solmupisteisiin kohdistuu eri lähteistä syntyviä lämpökuormia, jotka vaikuttavat solmupisteiden lämpötiloihin ja rakennuksen nettoenergian tarpeeseen. Sisäiset lämpökuormat aiheutuvat ihmisistä, valaistuksesta sekä koneista ja laitteista. Nämä lämpökuormat ovat sidoksissa rakennuksen käyttöprofiiliin ja tulevat tilaan osin säteilynä ja osin konvektiona. Sisäisten lämpökuormien lisäksi ikkunoista sisään tuleva auringon säteily aiheuttaa lämpökuorman, joka täytyy ottaa huomioon etenkin jäähdytysenergian tarvetta laskettaessa. Lämpökuormat jakautuvat solmupisteille siten, että ilmasolmupisteeseen

kohdistuu sisäisten lämpökuormien konvektiivinen osa ja rakennesolmupisteeseen kohdistuu sisäisten lämpökuormien säteilyosa sekä auringon säteilyn aiheuttama lämpökuorma. (Sirén 2015a)

Sisäiset lämpökuormat jaetaan konvektiiviseen osaan ja säteilyosaan kertoimen  $k_{kon}$  avulla, joka kuvaa konvektiivisen lämpökuorman osuutta yhteenlasketusta lämpökuormasta. Näin ollen sisäisen lämpökuorman konvektiivinen osa määritetään seuraan yhtälön mukaan.

$$\dot{Q}_{kon} = k_{kon} \dot{Q} \quad (18)$$

jossa lämpökuorma  $\dot{Q}$  aiheutuu joko rakennuksen käyttäjistä, valaistuksesta, tai laitteista. Sisäisten lämpökuormien säteilyosa määritetään nyt luonnollisesti yhteenlasketun lämpökuorman ja sen konvektiivisen osan erotuksena, jolloin se voidaan ilmaista yhtälön 19 muodossa.

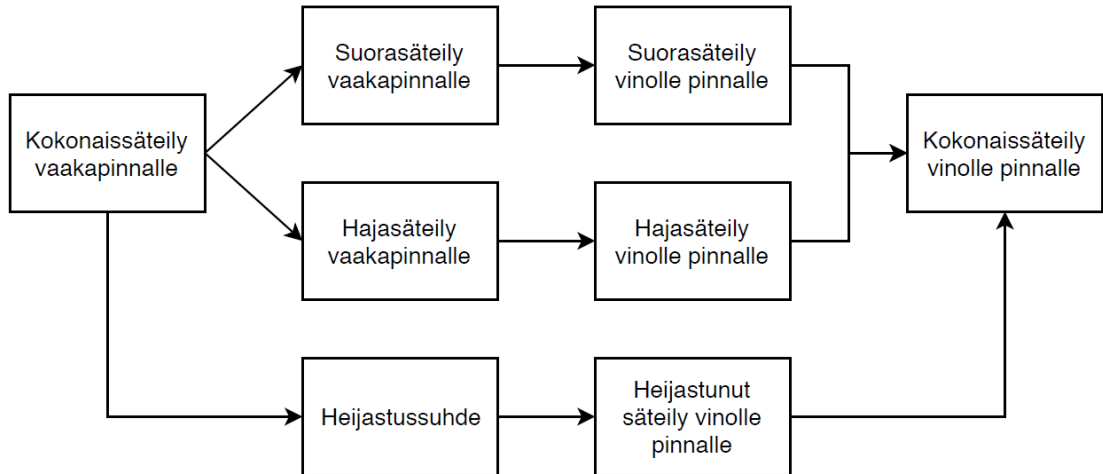
$$\dot{Q}_{sät} = (1 - k_{kon}) \dot{Q} \quad (19)$$

Tämän tutkimuksen piirissä toteutettavassa laskentamenetelmässä kertoimelle  $k_{kon}$  käytetään Sirénin (2015a) ehdottamia arvoja, jotka ovat ihmisten aiheuttamalle lämpökuormalle 0,70, laitteiden aiheuttamalle lämpökuormalle 1,0 ja valaistuksen aiheuttamalle lämpökuormalle 0,30.

Auringon säteilyn aiheuttamien lämpökuormien arvioimiseksi täytyy ensin selvittää ikkunapinnalle osuva säteilyvoimakkuus, jonka jälkeen siitä lasketaan ikkunan läpi huonetilaan pääsevä osa. Näin ollen tässä työssä täytyy säteilylaskentaa varten toteuttaa kaksi mallinnusta: pinnalle osuvan säteilyvoimakkuuden mallinnus sekä ikkunan säteilyn läpäisevyyden mallinnus. Pinnalle osuvan säteilyvoimakkuuden mallinnus suoritetaan nyt Seppäsen (2001, s. 39- 51) esittämien laskentaperiaatteiden ja yhtälöiden mukaisesti. Menetelmällä voidaan laskea mielivaltaiseen suuntaan osoittavalle tasaiselle pinnalle osuva säteilyvoimakkuus, kun tunnetaan pinnan sijainnin koordinaatit sekä sen kallistuskulma ja atsimuutti. Rakennuksen pinnoille kohdistuvan säteilyvoimakkuuden laskennan tapauksessa julkisivujen kallistuskulmaksi asetetaan 90° ja katon kallistuskulmaksi 0°. Pinnan sijaintiin ja suuntaukseen liittyvien parametrien lisäksi tarvitaan myös paikalliset säteilytiedot, jotka ovat usein saatavilla muiden säätietojen yhteydessä. Säteilyvoimakkuuden laskentamenetelmää ei ole tämän työn piirissä tarkoituksen mukaista käydä kokonaisuudessaan yksityiskohtaisesti läpi. Sen sijaan nyt esitetään vain menetelmän tärkeimmät periaatteet.

Pinnalle osuva kokonaissäteilyvoimakkuus koostuu kolmesta komponentista: pinnalle osuvasta suorasta säteilystä, hajasäteilystä ja heijastuneesta säteilystä. Suoralla säteilyllä on selvä suunta, kun taas hajasäteilyllä sitä ei ole. Heijastunut säteily on puolestaan ympäristöstä (yleensä maasta) heijastunutta säteilyä. Pinnalle osuvan kokonaissäteilyn laskemiseksi tulee tuntea auringon sijainti, johon vaikuttaa vuodenaika, pituuspiiri, leveyspiiri sekä kellonaika. Lisäksi täytyy tietää pinnan suuntaus, jotta voidaan laskea suoran säteilyn osumakulma. (Seppänen 2001, s. 39-51) Kuvassa 4 esitetään yleisen vinolle pinnalle osuvan säteilyvoimakkuuden laskennan eteneminen. Tästä laskentamenetelmästä poiketen, säätiedoissa ilmoitetaan usein auringonsädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle osuvan suorasäteilyn voimakkuus sekä vaakapinnalle osuvan haja- ja kokonaissäteilyn voimakkuudet. Tällöin suorasäteilyn voimakkuutta ei välttämättä tarvitse laskea vaakapinnalle osuvan kokonaissäteilyn kautta. Myös tälle laskentatavalle löytyy yhtälöt lähteestä Seppänen (2001, s. 39-51).





Kuva 4. Vinolle pinnalle osuvan säteilyvoimakkuuden laskennan eteneminen (Seppänen 2001, s. 45).

Ikkunan läpi huonetilaan pääsevä säteilyteho lasketaan nyt puolestaan Sirénin (2015a) esittämällä menetelmällä, mikä itsessään on yksinkertaistettu tapaus standardin SFS-EN ISO 13363-1 (2007) laskentamenetelmästä. Tässä menetelmässä suorasäteily ja hajasäteily käsitellään yhtenä komponenttina laskennan yksinkertaistamiseksi. Ikkunan läpäisevä säteilyteho riippuu säteilyn osumakulmasta ja saadaan nyt yhtälöstä 20. (Sirén 2015a)

$$\dot{Q}_{aur} = I A_{ikk} F_s F_f \tau_{eB} g (1 - (1 - \cos\theta)^3) \quad (20)$$

jossa  $I$  on ikkunan pinnalle osuva kokonaissäteilyn voimakkuus [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $A_{ikk}$  on ikkuna-aukon pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]  
 $F_s$  on suoran säteilyn ulkoisten varjostusten korjauskerroin [-]  
 $F_f$  on valoaukon ja ikkuna-aukon pinta-alojen suhde eli ns. kehäkerroin [-]  
 $\tau_{eB}$  on mahdollisen aurinkosuojaan läpäisysuhde [-]  
 $g$  on ikkunalasien kokonaisläpäisysuhde kohtisuoralle säteilylle eli g-arvo [-]  
 $\theta$  on suoran säteilyn osumakulma [ $^\circ$ ]

Niin kuin aiemmin jo mainittiinkin, solmupisteisiin kohdistuvat kokonaislämpökuormat lasketaan ilmasolmupisteen tapauksessa konvektiivisten lämpökuormien summana ja rakennesolmupisteen tapauksessa säteilylämpökuormien summana, jotka voidaan ilmaista yhtälöinä seuraavasti. (Sirén 2015a)

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{kon,ihmiset} + \dot{Q}_{kon,valaistus} + \dot{Q}_{kon,laitteet} \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{rak} = \dot{Q}_{sät,ihmiset} + \dot{Q}_{sät,valaistus} + \dot{Q}_{sät,laitteet} + \dot{Q}_{aur} \quad (22)$$

### 3.3.5 Ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmöntarpeet

Edellä kuvatun solmupistemallin avulla voidaan määrittää tiloihin suoraan tuotavan lämmitys- tai jäähdytysenergian tarve. Tämän lisäksi rakennuksessa esiintyy myös muita lämmöntarpeita, jotka on otettava huomioon energian kokonaiskäyttöä laskettaessa. Nykyään rakennukset varustetaan lähes poikkeuksetta koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdoilla, minkä lisäksi rakennukseen sisään puhallettavan tuloilman lämpötilan

halutaan pysyvän tiettyjen raja-arvojen sisällä. Tästä seuraa tuloilman lämmöntarve, joka täytetään osin ilmanvaihdon lämmöntalteenoton (LTO) avulla ja osin tuloilman lämmitys- tai jäähdytyspatterin avulla. Ilmanvaihdon jälkilämmityksen tai jäähdytyksen tehon tarve lasketaan tässä tapauksessa seuraavan yhtälön mukaan.

$$\dot{Q}_{iv} = k_{iv} c_{pi} \rho_i \dot{V}_{ti} (T_{ti} - T_{lto}) \quad (23)$$

jossa  $k_{iv}$  on ilmanvaihdon käyttöastekerroin väliltä 0-1 [-]  
 $T_{lto}$  on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen [K]

Tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen lasketaan tässä työssä lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhteen  $\eta_{lto}$  avulla, joka määritetään yhtälön 24 mukaisesti.

$$\eta_{lto} = \frac{T_{lto} - T_u}{T_i - T_u} \quad (24)$$

Mikäli halutaan tietää myös talteenoton lämpöteho, voidaan se laskea yhtälön 25 avulla.

$$\dot{Q}_{lto} = k_{iv} c_{pi} \rho_i \dot{V}_{ti} (T_{lto} - T_u) \quad (25)$$

Tämän laskentamenetelmän puitteissa LTO:n lämpötilahyötysuhde oletetaan tunnetuksi (käyttäjän syöttämä lähtöarvo), jolloin voidaan laskea tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen. Tuloilman lämpötilalle määritetään asetusarvo, jonka jälkeen tuloilman lämmityksen tai jäähdytyksen energian tarve sekä LTO:ssa talteen otetun lämmön määrä lasketaan.

Kuten luvussa 3.1 jo näytettiin, rakennuksessa tarvitaan energiaa myös käyttöveden lämmittämiseen. Tässä tapauksessa käyttöveden lämmitykseen tarvittava energia mallinnetaan hyvin yksinkertaisesti ja laskijan syöttämään ominaiskulutusarvioon perustuen. Käyttöveden lämmitystarve lasketaan yhtälön 26 mukaan.

$$\dot{Q}_{lkv} = c_{pv} \rho_v \dot{V}_{lkv} (T_{lkv} - T_{kv}) \quad (26)$$

jossa  $c_{pv}$  on veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]  
 $\rho_v$  on veden tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\dot{V}_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden virtaama [m<sup>3</sup>/s]  
 $T_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden lämpötila [K]  
 $T_{kv}$  on kylmän vesijohtoveden lämpötila [K]

Lämpimän käyttöveden virtaama lasketaan laskennan lähtötietona annettavan vuotuisen lämpimän käyttöveden energian ominaiskulutuksen ja rakennuksen käyttöasteen avulla erikseen kullekin laskennan aika-askeleelle. Yhtälönä tämä laskentamenettely saa seuraavan muodon.

$$\dot{V}_{lkv} = \frac{k_{ihmiset}}{\sum_{j=1}^n k_{ihmiset,j}} \cdot \frac{q_{lkv} A_{rak}}{c_{pv} \rho_v (T_{lkv} - T_{kv}) \Delta t} \quad (27)$$

jossa  $k_{ihmiset}$  on rakennuksen käyttäjien paikalla oloa kuvaava käyttöastekerroin [-]  
 $n$  on laskentajakson pituus [h]  
 $q_{lkv}$  on lämpimän käyttöveden vuotuinen ominaiskulutus [J/m<sup>2</sup>]  
 $A_{rak}$  on rakennuksen lämmitetty pinta-ala [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta t$  on laskennan aika-askeleen pituus [s]

Kuten muutkin lämmöntarpeet, tuloilman ja lämpimän käyttöveden tarvitsema energia lasketaan tässä työssä tunnin aika-askeleella. Lämpimän käyttöveden jakelussa tapahtuvia

häviöitä ei nyt lasketa erikseen, mutta ne voidaan ottaa huomioon luvussa 3.3.7 esitettävässä käyttöveden lämmitysjärjestelmän kokonaishäviössä.

### 3.3.6 Sähköenergian tarpeen laskenta

Rakennuksen sähköenergian kokonaistarve muodostuu valaistuksen, kuluttajalaitteiden ja taloteknisten järjestelmien yhteenlasketusta kulutuksesta. Tässä mallissa valaistuksen sekä kuluttajalaitteiden sähkön kulutus lasketaan yksinkertaisesti käyttöastekertoimen (arvo välillä 0-1), pinta-alayksikköä kohden määritetyn ominaiskulutuksen, lämmitettävän pinta-alan ja laskennan aika-askelen tulona. Taloteknisten laitteiden sähköenergian tarve on puolestaan ilmanvaihtolaitteiston, lämmitysjärjestelmän ja jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutuksien summa. Ilmanvaihtolaitteiston sähköteho lasketaan sille määritetyn ominaissähkötehon (SFP-luvun) avulla. Ominaissähköteho ilmoittaa ilmanvaihtokoneen tarvitseman sähkötehon ilman tilavuusvirran yksikköä kohti. Tässä tapauksessa laskennassa otetaan huomioon vielä ilmanvaihtolaitteiston käyttöaste, jolloin ilmanvaihdon käyttämän sähköteho lasketaan seuraavasti.

$$\dot{W}_{iv} = SFP k_{iv} \dot{V}_{iv} \quad (28)$$

Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tarvitsema apusähkön määrä puolestaan riippuu siitä, minkälainen järjestelmä on kyseessä. Tyypillisesti vaadittu apusähkön määrä on myös pieni verrattuna varsinaisen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen. Näistä syistä sekä laskentatyökaluun liittyvistä tavoitteista johtuen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien apusähkön kulutus jätetään tässä laskentamenetelmässä nyt huomioimatta. Myöskään rakennuksen muiden teknisten järjestelmien, kuten hissien sähkön tarvetta ei erikseen ole otettu huomioon tässä menetelmässä. Näin ollen rakennuksen sähköenergian tarve muodostuu tässä laskentamenetelmässä valaistuksen, kuluttajalaitteiden ja ilmanvaihdon sähkön tarpeiden summasta. Mikäli osa tai kaikki rakennuksessa tarvittavasta lämmitys- tai jäähdytysenergiasta kehitetään sähköllä toimivalla laitteistolla rakennuksen sisällä, lisätään tämä määrä vielä sähköntarpeeseen.

### 3.3.7 Taloteknisten järjestelmien häviöt

Rakennuksen nettoenergiantarpeet kuvaavat sitä energian määrää, mikä tarvitaan olosuhteiden ja palveluiden tuottamiseen, mikäli se voitaisiin tehdä häviöttä. Todellisuudessa rakennusten teknisissä järjestelmissä esiintyy aina häviöitä, jotka täytyy ottaa huomioon energian käyttöä tarkastellessa. Esimerkiksi lämmitysjärjestelmissä häviöitä esiintyy lämmön kehityksen, jaon ja luovutuksen laitteistoissa. Laitteistokokonaisuuden kunkin komponentin häviöt on mahdollista laskea erikseen, mikäli riittävät lähtötiedot ovat käytössä. (Ympäristöministeriö 2018) Tässä tutkimuksessa niin ei kuitenkaan tehdä, vaan ongelman yksinkertaistamiseksi teknisten järjestelmien (tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitysjärjestelmät, tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytysjärjestelmät, sekä sähköjärjestelmät) häviöt huomioidaan kokonaishyötysuhteiden avulla. Kullekin järjestelmälle määritetään nyt hyötysuhde erikseen, jonka jälkeen niiden energian käytön tehoprofiilit voidaan laskea yhtälön 29 mukaan.

$$\dot{E}_{käyttö} = \frac{\dot{E}_{tarve}}{\eta} \quad (29)$$

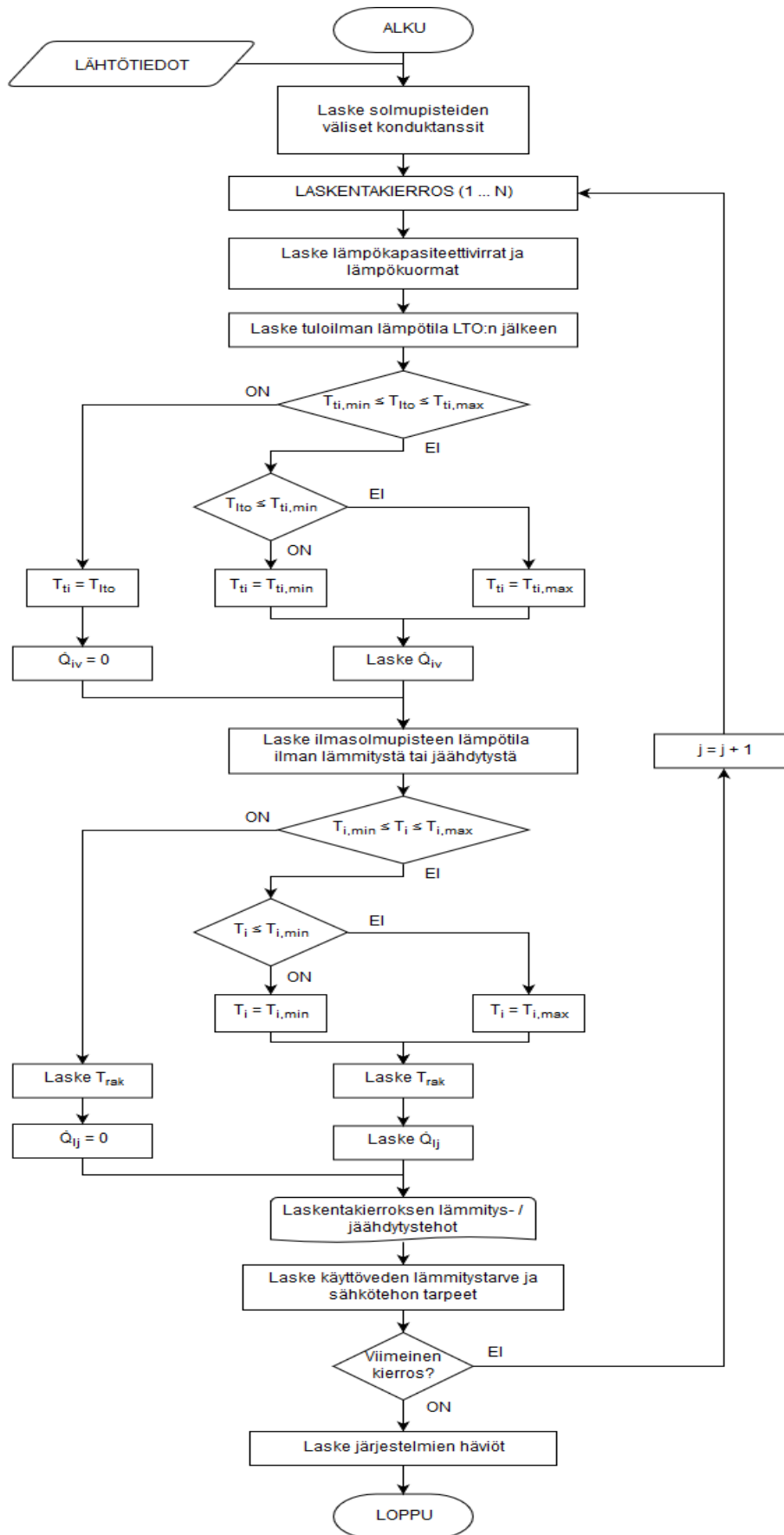
jossa symboli  $\dot{E}$  kuvaa yleisesti energiavirtaa, eli tässä tapauksessa joko lämmitys-, jäähdytys- tai sähkötehoa.

### 3.3.8 Energialaskennan kulku

Edellä kuvattiin rakennuksen yksinkertaistetussa energialaskentamenetelmässä käytetyt periaatteet ja yhtälöt. Jotta laskennasta saadaan oikeanlaisia tuloksia, täytyy sen vaiheet suorittaa tietyssä järjestyksessä. Laskentamenettelyn yleinen eteneminen kuvataan tässä luvussa. Laskentavaiheiden järjestys perustuu jälleen Sirénin (2015a) esittämän menetelmän etenemiseen, sisältäen kuitenkin joitakin eroavaisuuksia. Ennen laskennan aloitusta täytyy rakennuksen energiasimuloinnin parametrit luonnollisesti määrittää. Tarvittavia tietoja ovat esimerkiksi rakennusvaipan geometria ja sen osien U-arvot sekä lämpötilojen asetusarvot. Sekä tuloilman, että sisäilman lämpötiloille täytyy asettaa ala- ja ylärajat joiden välissä järjestelmien ideaaliseksi oletettu säätö pitää lämpötilan. Ennen varsinaisen, tunnin aika-askeleella suoritettavan laskennan aloittamista määritetään vielä laskennan ajan vakiona pysyvät lämpökonduktanssit. Koska tuloilman ja vuotoilman lämpökapasiteettivirrat ovat riippuvaisia niiden ilmavirroista, jotka voivat tässä tapauksessa muuttua ajan funktiona, lasketaan ne erikseen jokaiselle aika-askeleelle.

Kun tarvittavat vakiona pysyvät lähtötiedot ja konduktanssit on määritetty, aloitetaan energian nettotarpeiden laskenta tunnin aika-askeleella. Aika-askeleen sisällä lasketaan ensin lämpökapasiteettivirrat sekä solmupisteisiin kohdistuvat lämpökuormat säteilytietojen, ominaislämpökuormien ja käyttöaikataulujen perusteella. Säteilytiedot ja ulkolämpötila saadaan laskennan perustana olevista säätiedoista. Ensimmäisen aika-askeleen osalta pitää myös arvata sisäilman solmupisteen lämpötilan arvo. Lämpökuormien jälkeen voidaan laskea tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen, jonka perusteella määritetään tuloilman lämmityksen tai jäähdytyksen nettotarve. Mikäli tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen on asetusarvon alarajan alapuolella, tarvitaan lämmitystehoa. Vastaavasti mikäli lämpötila LTO:n jälkeen on ylärajan yläpuolella, tarvitaan jäähdytystehoa. Tämän jälkeen voidaan laskea ilmasolmupisteen lämpötila ilman lämmitystä tai jäähdytystä. Mikäli lämpötila jää alle asetusarvon alarajan, tarvitaan lämmitystehoa ja jos lämpötila ylittää asetusarvon ylärajan, tarvitaan jäähdytystehoa. Sekä tuloilman, että sisäilman lämmitys- tai jäähdytystehoa laskiessa oletetaan, että lämpötilat asetetaan tarvetta vastaavaan raja-arvoon. Tämän jälkeen lasketaan vielä rakennesolmupisteen lämpötila.

Kun sisätilan ja tuloilman lämmitys-/jäähdytystehon nettotarpeet sekä solmupisteiden todelliset lämpötilat on määritetty, lasketaan vielä lämpimän käyttöveden lämmityksen tehon tarve sekä valaistuksen, laitteiden ja taloteknisten järjestelmien muodostama sähkötehon tarve. Tämän jälkeen siirrytään laskemaan seuraavaa aika-askelta tai jos kyseessä oli viimeinen aika-askel, lopetetaan nettotarpeiden laskenta. Lopuksi nettotarpeet jaetaan vielä järjestelmien hyötysuhteilla häviöiden huomioon ottamiseksi. Tämän jälkeen laskenta on suoritettu kaikilta osin loppuun. Energialaskennan eteneminen on esitetty myös vuokaaviona kuvassa 5.



Kuva 5. Energialaskennan kulku (mukaillen Sirén 2015a).

## 4 Energian tuotanto

Kuten aiemmin kävi jo ilmi, energian tuotantomuotojen valinnalla ja mitoituksella on suuri vaikutus alueellisen energiajärjestelmän taloudelliseen ja ekologiseen toimivuuteen. Tästä syystä alueellisen energiajärjestelmän tuotantoon liittyvät seikat tulee tutkia tapauskohtaisesti ottaen huomioon hankkeelle asetetut tavoitteet sekä rakennuspaikan asettamat vaatimukset ja rajoitteet. Yleisesti alueellisissa energiajärjestelmissä kannattaa pyrkiä paikallisten uusiutuvien energianlähteiden mahdollisimman korkeaan hyödyntämistaseseen kuitenkin käytännöllisyyden, luotettavuuden ja taloudellisuuden asettamissa rajoissa. Tämän tutkimuksen piirissä tarkastellaan Koutalaen alueellisen hybridienergiajärjestelmän toteutukseen alustavasti valittuja energiantuotantojärjestelmiä. Tarkasteluun valittuihin energian tuotantomenetelmiin kuuluu lämpökattila, sähkön ja lämmön yhteistuotanto, maalämpö sekä aurinkoenergia. Tässä osassa esitetään tutkimuksen analyysissa ja laskentatyökalun toteutuksessa tarvittava teoria kullekin energian tuotantomenetelmälle.

### 4.1 Lämpökattilalaitos

Lämpökattila on paineastia, jossa tuotetaan joko kuumaa vettä tai höyryä hallitun lämmön lähteen avulla. Yleensä tarvittava lämpöenergia tuotetaan polttoaineista, jolloin kattilaan liitetään tarpeeseen sopiva poltin. Periaatteessa lämpökattilassa voidaan kuitenkin tuottaa energiaa millä tahansa lämmön lähteellä, kunhan sen lämpötilataso on riittävän korkea. Näin ollen kattilalaitosten polttoainevalikoima onkin erittäin laaja. Kattilalaitoksella viitataan yleisesti järjestelmäkokonaisuuteen, jossa kuuma vesi tai höyry tuotetaan ja jolla se siirretään käyttökohteeseen. Lämpökattiloiden käytännön toteutukseen on olemassa useita teknisiä ratkaisuja, joiden valinta perustuu aina käyttökohteen tarpeisiin. Tärkeimpiä valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat laitoksen kapasiteetti, käyttölämpötilat ja paineet, käytettävät polttoaineet sekä päästövaatimukset. (Petchers 2012, s. 87-100)

Tämän työn kannalta olennaisessa osassa ovat kotimaista polttoainetta käyttävät kattilalaitokset (KPA-kattilat). Kotimaisilla polttoaineilla tarkoitetaan tässä tapauksessa Suomessa tuotettuja biopolttoaineita. KPA-kattiloissa käytettävät polttotekniikat ovat kiertopeti-, kerrosleiju-, kaasutus-, sekä arina- ja stokeripoltot. Kiertopetikattilat ovat Suomessa käytössä lähinnä yli 100 MW tehokokoluokan laitoksissa, kun taas muita edellä mainittuja polttotekniikoita käytetään myös pienemmissä laitoksissa. Kerrosleijupolttoa käytetään yleisesti yli 10 MW tehokokoluokassa, mutta sitä voidaan hyödyntää myös noin 2 MW tehoon asti. Alle 10 MW tehokokoluokissa puolestaan käytetään yleisimmin arina- tai stokeripolttoa. Näitä polttotekniikoita voidaan kuitenkin hyödyntää myös suuremmissa laitoksissa. Yleisesti polttotekniikan valinnan lähtökohtana on, että niissä käytetään parasta saatavilla olevaa tekniikkaa eli niin sanottua BAT-periaatetta. (Energiateollisuus 2012)

Polttotekniikan ohella kattilan tehokkuuteen ja hyötysuhteeseen vaikuttaa siinä käytettävien polttoaineiden ominaisuudet. Biopolttoaineiden tapauksessa etenkin polttoaineen kosteus vaikuttaa laitoksen hyötysuhteeseen siten, että hyötysuhde laskee polttoaineen kosteuden kasvaessa. Näin ollen KPA-kattilaa suunnitellessa on syytä tarkastaa millä polttoaineella ja kosteudella laitoksen mitoitus-teho on määritetty. KPA-kattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat lisäksi savukaasujen loppulämpötila ja happipitoisuus. Savukaasujen loppulämpötilaa alentamalla laitoksen hyötysuhdetta voidaan parantaa, mutta käytännössä loppulämpötilaa rajoittaa niin sanottu happokastepiste. Happokastepisteellä tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa savukaasujen sisältämä rikkitrioksidi muodostaa

tiivistyvän veden kanssa rikkihappoa, joka voi puolestaan syövyttää kattilan lämmönsiirtopintoja. Savukaasujen happipitoisuus puolestaan vaikuttaa hyötysuhteeseen siten, että suurempi happipitoisuus pienentää hyötysuhdetta. Lisäksi kattilalaitoksen hyötysuhde muuttuu osatehon funktiona ja se on parhaimmillaan kattilan toimiessa nimellistehollaan. Palamisen hallinta hankaloituu pienillä osatehoilla, minkä seurauksena hyötysuhde pienenee säteily- ja johtumishäviöiden sekä ilmakertoimen kasvun johdosta. (Energiateollisuus 2012)

Koska kattilalaitoksessa tapahtuvien prosessien tarkka mallintaminen vaatisi syvällistä perehtymistä juuri kyseessä olevalle kattila- ja polttotekniikalle ominaisiin piirteisiin, tyydytään tämän työn puitteissa toteuttamaan yksinkertainen hyötysuhdemalli. Tässä laskentamallissa kattilalaitoksen minimi- ja maksimitehot sekä hyötysuhdekäyrä oletetaan tunnetuiksi. Näiden parametrien ja kuorman avulla lasketaan kattilalaitoksen polttoaineteho yhtälön 30 mukaan.

$$\dot{Q}_{pa} = \frac{\dot{Q}_{kuorma}}{\eta} \quad (30)$$

jossa  $\eta$  on laitoksen hyötysuhde [-]  
 $\dot{Q}_{kuorma}$  on laitoksen tuottama hyödyllinen lämpöteho [W]  
 $\dot{Q}_{pa}$  on laitoksen tarvitsema polttoaineteho [W]

Jos kuorma on suurempi kuin kattilalaitoksen maksimiteho, asetetaan yhtälöön 30 kuorman tilalle laitoksen tuotannon maksimiteho. Vastaavasti mikäli kuorma on pienempi, kuin minimiteho, asetetaan kuormaksi nolla. Kattilalaitoksen käyttämä polttoaineen massavirta saadaan, kun polttoaineteho jaetaan polttoaineen lämpöarvolla ( $HV$ ) eli

$$\dot{m}_{pa} = \frac{\dot{Q}_{pa}}{HV} \quad (31)$$

Kattilalaitoksen lämmöntuotantoprosessista riippuen polttoaineen lämpöarvona käytetään joko kalorimetristä (ylempää) lämpöarvoa  $HHV$  tai tehollista (alempaa) lämpöarvoa  $LHV$ . Yleisimmin käytössä on kuitenkin tehollinen lämpöarvo eli  $LHV$ . Tässä työssä toteutettavassa mallinnuksessa polttoaineen kulutuksen massavirta voidaan määrittää vaihtoehtoisesti myös kattilalaitoksen täyden tehon polttoaineen kulutuksen perusteella. Tällöin hetkellinen polttoaineen massavirta määritetään osakuorman, hetkellisen hyötysuhteen, sekä täyden tehon hyötysuhteen ( $\eta_{100}$ ) ja polttoaineen massavirran ( $\dot{m}_{100}$ ) avulla seuraavasti.

$$\dot{m}_{pa} = \frac{\dot{Q}_{tuotto}}{\dot{Q}_{max}} \cdot \frac{\eta_{100}}{\eta} \cdot \dot{m}_{100} \quad (32)$$

Kattilalaitoksen omakäyttösähkön tarve puolestaan lasketaan prosentuaalisena osuutena kattilan tuottamasta hyödyllisestä lämpötehosta. Edellä kuvatun laskentamallin suurimpana etuna on se, että se on joustava ja sopii käytännössä mille tahansa kattilalaitokselle käytetystä teknologiasta riippumatta. Toisaalta mallin käyttö edellyttää laskentaparametreihin liittyvää mahdollista taustatutkimusta.

## 4.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Sähkön ja lämmön yhteistuotannon ratkaisuilla voidaan nimensä mukaan tuottaa sähköä ja lämpöä samassa prosessissa yhtä aikaa. Yhteistuotantoon on olemassa useita teknologioita, joista suurin osa perustuu polttoprosesseissa vapautuvaan lämpöenergiaan. Voimalaitosmittakaavassa yleisimmät sähkön ja lämmön yhteistuotannon teknologiat ovat Rankine-prosessiin perustuvat höyryturbiinilaitokset sekä Brayton-prosessiin perustuvat kaasuturbiinilaitokset, joissa sähkön tuotannossa syntynyt hukkalämpö käytetään hyödyksi. Laitosta, jossa yhdistetään kaasuturbiini ja höyryvoimala, kutsutaan kombivoimalaitokseksi. Vaikka kaasu- ja höyryturbiineihin perustuvat laitokset ovatkin yleisimpiä suurissa laitoksissa, voidaan niitä teknologian puolesta hyödyntää myös pienen mittakaavan yhteistuotannossa. Tyypillisin kaasuturbiinilaitoksissa käytetty polttoaine on maakaasu, mutta valmistajan hyväksynnän perusteella myös muita polttoaineita voidaan käyttää. Höyryturbiinilaitoksissa voidaan käyttää lähes mitä vain polttoainetta, sillä itse turbiinin läpi virtaava höyry tuotetaan erillisessä kattilassa. (Petchers 2012, s.140-330)

Pienemmän mittakaavan yhteistuotannossa voidaan myös käyttää polttomootoreita, joiden toiminta voi perustua joko Otto-, tai Diesel-sykliin. Otto-sykliin perustuvat moottorit käyttävät tyypillisesti kaasumaisia tai helposti höyrystyviä nestemäisiä polttoaineita, kuten maakaasua, biokaasuja tai bensiiniä. Diesel-moottorit puolestaan käyttävät nestemäisiä öljypohjaisia polttoaineita. Moottoriteknologioihin perustuvat yhteistuotantomenetelmät ovat tyypillisesti tehokkaampia, kuin muut saman kokoluokan vaihtoehtoiset ratkaisut. Polttoprosesseihin perustuvien ratkaisujen lisäksi pienemmän mittakaavan yhteistuotannossa voidaan hyödyntää polttokennoja, joissa kemiallinen energia muunnetaan suoraan sähköenergiaksi. Polttokennojen tyypillinen hyöty onkin niiden vähäiset ympäristölle haitalliset päästöt. Polttokennossa korkean vetypitoisuuden omaava kaasu reagoi hapen kanssa tuottaen hyödyllistä sähkö- ja lämpöenergiaa. Polttoaineena toimiva vetykaasu tuotetaan usein maakaasusta erillisessä prosessissa. Markkinapotentiaaliltaan polttokennot eivät ole vielä niin kypsiä, kuin useimmat muut yhteistuotannon teknologiat, minkä johdosta ne eivät useinkaan ole kilpailukykyisiä kustannusten kannalta. (Petchers 2012, s. 140-330)

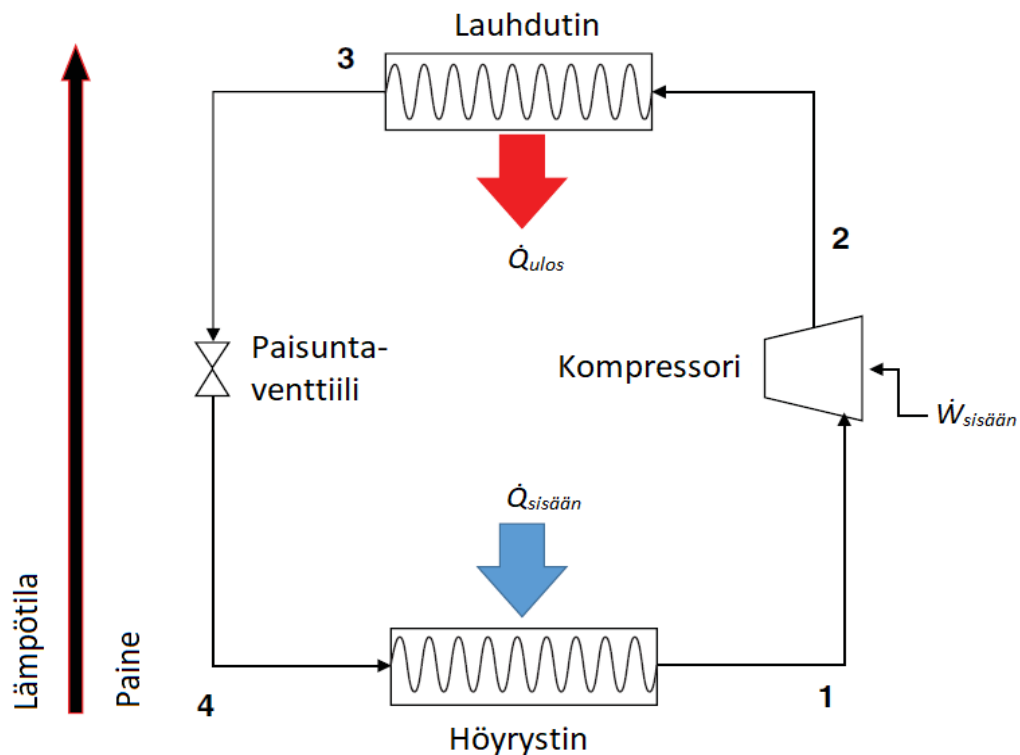
Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten mallintamisessa vaikuttaa tämän työn osalta sama rajoitus, kuin lämpökattilalaitosten tapauksessa: erilaisia vaihtoehtoja ja teknologioita on niin monia, että kaikkiin niihin perehtyminen ja laskentamallien yksityiskohtainen toteuttaminen on tämän työn aikataulun kannalta mahdotonta. Tällainen yksityiskohtainen lähestymistapa ei myöskään palvelisi työlle asetettuja tavoitteita. Niinpä CHP-laitosten osalta päädytään samanlaiseen ratkaisuun, kuin kattilalaitosten mallinnuksessa. Yhteistuotannon laskentamalliksi valitaan yksinkertainen hyötysuhdemalli, jossa laitoksen polttoaineteho lasketaan yhtälön 30 mukaan. Erona kattilalaitoksen malliin on kuitenkin se, että nyt polttoaineteho voidaan laskea joko sähkön tai lämmön tuotannon hyötysuhteen perusteella. Näistä valitaan toinen, jonka jälkeen jäljelle jäävän energiamuodon tuotannon teho määritetään laitoksen tuotantokäyrän perusteella. Tuotantokäyrä ilmaisee laitoksen sähkön ja lämmön tuotannon tehon sähköntuotannon osakuorman funktiona ja se oletetaan tässä tapauksessa tunnetuksi. Polttoaineen kulutuksen massavirta voidaan jälleen laskea lämpöarvon tai täyden tehon kulutuksen mukaan, eli yhtälön 31 tai 32 mukaan. Yhteistuotannon laskentamalliin pätee samat huomiot, kuin kattilalaitosten tapauksessa, eli se on joustava ja yleiskäyttöinen, mutta vaatii jonkin verran taustatutkimusta suorituskkyarvoihin liittyen.



### 4.3 Lämpöpumppu ja maalämpö

Maalämpöä voidaan hyödyntää sen lämpötilatasosta riippuen joko suoraan tai lämpöpumpun avulla. Maalämmön suora hyödyntäminen on mahdollista, jos varannosta saatavan energian lämpötilataso on korkeampi, kuin energian tarpeiden vaatima korkein lämpötilataso. Näin ollen maalämmön suoran hyödyntämisen mahdollisuudet riippuvat myös siitä, mihin maalämpöä aiotaan käyttää. Mikäli maalämmön lämpötilataso on energian tarpeiden vaatimaa lämpötilatasoa matalampi, täytyy sen lämpötila tällöin nostaa sopivalle tasolle lämpöpumpun avulla. (Chiasson 2016, s. 5-18) Tässä työssä keskitytään vain viimeksi mainittuun tapaukseen, eli lämpöpumppuperusteisiin maalämpöratkaisuihin. Chiasson (2016, s. 13-17) näyttää, että lämpöpumpun avulla geoenergiaa voidaan hyödyntää monista lämmönlähteistä ja useilla erilaisilla lämmönkeruupiireihin liittyvillä teknisillä ratkaisulla. Järjestelmän toiminnan analysointi edellyttää nyt siis lämpöpumpun toiminnan tarkastelua, maalämmön keruupiirin ja maaperän lämpötilatasojen tarkastelua sekä lämmön käyttökohteessa tarvittavien lämpötilatasojen tarkastelua. Tässä tapauksessa aloitetaan lämpöpumppuun ja sen laskentamalliin liittyvistä tarkasteluista.

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa matalamman lämpötilatason ( $T_C$ ) omaavasta lämpövarannosta korkeamman lämpötilatason ( $T_H$ ) varantoon prosessiin ulkopuolelta syötettävän energian avulla. Yleisimmin tämä prosessi perustuu mekaanisella kompressorilla toimivaan kylmäainekiertoon, mutta myös vaihtoehtoisia teknologioita on olemassa. Esimerkkinä voidaan mainita lämpöenergiaa prosessin ajavana voimana hyödyntävät teknologiat, kuten absorptiolämpöpumput. (Chiasson 2016, s. 309-312) Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin vain mekaanisen kompressorin avulla toimivien lämpöpumppujen tarkasteluun. Kompressorilämpöpumpun peruskomponentit ja prosessin eri vaiheet on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kompressorilämpöpumpun kylmäaineprosessin peruskomponentit ja vaiheet (mukaihen Chiasson 2016, s. 327).

Kompressorilämpöpumpun kiertoprosessin toiminta perustuu kylmäaineen faasimuutoksiin sen eri vaiheissa. Prosessissa 1-2 höyrystynyt kylmäaine nostetaan korkeampaan lämpötilaan ja paineeseen kompressorin avulla, mikä vaatii ulkopuolisen tehon syöttöä kiertoprosessiin. Prosessissa 2-3 korkeassa lämpötilassa ja paineessa oleva höyrystynyt kylmäaine luovuttaa lämpöä itseään viileämpään ympäristöön lauhduttimessa, minkä seurauksena se lauhtuu nestemäiseen olomuotoon. Paisuntaventtiilissä (prosessi 3-4) nestemäinen kylmäaine puolestaan paisuu höyrystinpaineeseen, jolloin sen lämpötila myös laskee. Tämän vaiheen jälkeen kylmäaineen tila on usein nestemäisen ja kaasumaisen olomuodon sekoitus. Lopulta prosessissa 4-1 kylmäaine ottaa vastaan lämpöä itseään lämpimämmästä lähteestä ja höyrystyy jälleen täysin kaasumaiseen olomuotoon. (Chiasson 2016, s. 324-328) Edellä kuvattu kiertoprosessi toimii yleisesti kompressorilämpöpumppujen perustana. Käytännön lämpöpumpuissa prosessi voi kuitenkin olla jaettu useampaan vaiheeseen käyttötärpeestä riippuen. Tämän työn kannalta riittää kuitenkin vain kompressorilämpöpumpun toiminnan yleisen periaatteen ymmärtäminen, eikä sitä tässä käsitellä tämän tarkemmin.

Itse lämpöpumpun toiminnan ja sen energiavirtojen mallinnus tapahtuu nyt lähteessä Laitinen et al. (2014) esitetyllä laskentamenetelmällä, joka perustuu lämpöpumpun hyötysuhteen, eli niin sanotun COP-arvon määrittämiseen eri tilanteissa. Lämpöpumpun todellinen COP-arvo määritetään yleisessä tapauksessa lämpöpumpun tuottaman hyödyllisen tehon ja sen tarvitseman ulkopuolisen työn osamääränä. Matemaattiset määrittelyt poikkeavat riippuen siitä, tuotetaanko lämpöpumpulla lämmitys- vai jäähdytysenergiaa. Lämmitystilanteessa määritelmä voidaan kuvata yhtälön 33 mukaan ja jäähdytystilanteessa puolestaan yhtälön 34 mukaan. (Chiasson 2016, s. 312-313)

$$COP_{lämmitys} = \frac{\dot{Q}_{ulos}}{\dot{W}_{sisään}} \quad (33)$$

$$COP_{jäähdytys} = \frac{\dot{Q}_{sisään}}{\dot{W}_{sisään}} \quad (34)$$

joissa $\dot{Q}_{ulos}$	on lauhduttimesta ympäristöön luovutettu lämpöteho [W]
$\dot{Q}_{sisään}$	on höyrystimen ympäristöstä vastaanottama lämpöteho [W]
$\dot{W}_{sisään}$	on kompressorin kautta prosessin sisään tuotu teho [W]

Laitisen et al. (2014) esittämässä laskentamenetelmässä todellisen COP-arvon katsotaan olevan verrannollinen lämpöpumpun teoreettiseen maksimihyötysuhteeseen. Todellisissa lämpöpumpuissa esiintyvät häviöt otetaan mallissa huomioon niin sanotun häviökertoimen avulla, joka määritetään tarkasteltavasta lämpöpumpusta tehtyjen mittausten perusteella. Tässä menetelmässä lämpöpumpun tuottama hyödyllinen lämpöteho määritetään seuraavan yhtälön mukaan.

$$\dot{Q}_{lp} = \dot{Q}_{lp,max} \frac{COP_{lp}}{COP_{mit}} \quad (35)$$

joissa $\dot{Q}_{lp,max}$	on lämpöpumpun suurin lämpöteho mittauspisteessä [W]
$COP_{mit}$	on lämpöpumpun todellinen hyötysuhde mittauspisteessä [-]
$COP_{lp}$	on lämpöpumpun laskennallinen hyötysuhde [-]

Tehosäädettävillä lämpöpumpuilla todellinen tuotettu lämpöteho on kuorman tehontarpeen mukainen, mikäli se ei ylitä yhtälön 35 määrittämää maksimiarvoa. Mittauspisteen lämpöteho ja hyötysuhde saadaan käytännössä puolestaan valmistajan antamista

laitetiedoista, kun taas laskennallinen hyötysuhde määritetään teoreettisen maksimihiötysuhteen ja häviökertoimen avulla, yhtälön 36 mukaan.

$$COP_{lp} = k_{häviö} COP_{teor} \quad (36)$$

jossa  $COP_{teor}$  on lämpöpumpulle laskettu teoreettinen maksimihiötysuhde ja jossa häviökerroin  $k_{häviö}$  lasketaan seuraavasti.

$$k_{häviö} = \frac{COP_{mit}}{COP_{mit,teor}} \quad (37)$$

jossa  $COP_{mit}$  on lämpöpumpun hyötysuhde mittauspisteessä [-]  
 $COP_{mit,teor}$  on lämpöpumpun teoreettinen hyötysuhde mittauspisteessä [-]

Tässä työssä oletetaan, että  $COP_{mit}$  on mitattu vain yhdessä pisteessä, minkä seurauksena häviökerroin pysyy vakiona koko laskentajakson ajan. Häviökerroin voitaisiin määrittää myös osatehon funktiona, mutta tässä työssä se on jätetty tekemättä laskennan ja lähtötietojen löytämisen yksinkertaistamiseksi. (Laitinen et al. 2014)

Häviökertoimen yhtälössä esiintyvä lämpöpumpun teoreettinen maksimihiötysuhde riippuu puolestaan prosessiin kytkettyjen lämpövarantojen lämpötilataseista. Jälleen on huomioitava, että maksimihiötysuhteet määritetään eri tavalla lämmitys- ja jäähdytystilanteille. Lämmitystilanteessa teoreettinen maksimihiötysuhde määritetään yhtälön 38 mukaan, kun taas jäähdytystilanteessa määritelmä saa yhtälössä 39 esitetyn muodon. (Chiasson 2016, s. 309-312)

$$COP_{teor,lämmitys} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (38)$$

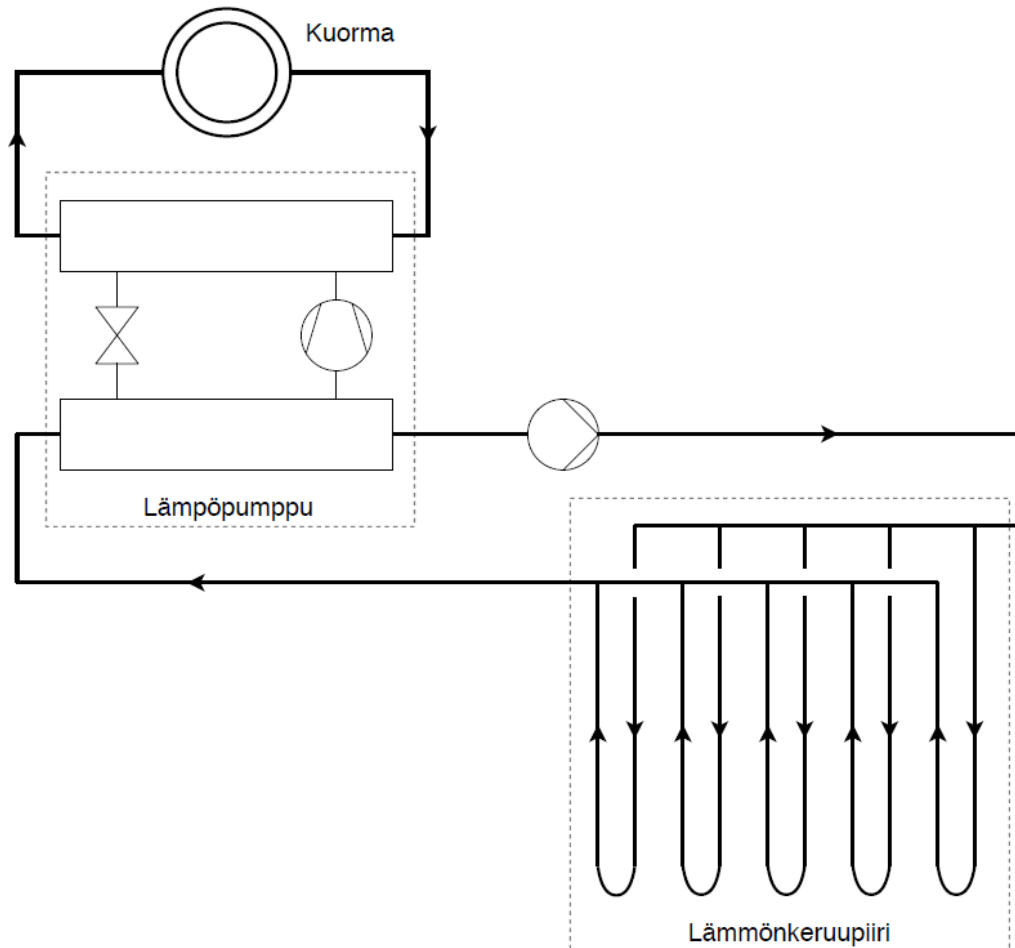
$$COP_{teor,jäähdytys} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (39)$$

Käytännön järjestelmiin liittyvissä tarkasteluissa lämmitystilanteessa korkeamman lämpötilatason varannon lämpötila  $T_H$  on usein lämmitysverkoston menoveden lämpötila, kun taas jäähdytystilanteessa se on lämmönlähteen lämpötila. Alemman lämpötilatason varannon lämpötila  $T_C$  on puolestaan lämmitystilanteessa lämmönlähteen lämpötila ja jäähdytystilanteessa jäähdytysverkoston menoveden lämpötila. Huomion arvoista on, että sekä menoveden lämpötilat, että lämmönlähteen lämpötila voivat vaihdella ajan funktiona, jolloin myös lämpöpumpun hyötysuhde muuttuu. Tämän seurauksena lämpöpumpun oikeaoppista tehon tarkastelua varten tulisi selvittää sekä lämmönlähteestä saatavilla olevan energian lämpötilatase, että energian tarpeiden vaatima lämpötilatase ajan funktiona. Kun sekä tuotettu lämpöteho sekä todellinen hyötysuhde on laskettu, voidaan määrittää lämpöpumpun prosessiin tarvittava lisäteho. Se lasketaan tuotetun lämpötehon ja todellisen hyötysuhteen osamääränä, eli yhtälön 40 mukaisesti (Laitinen et al. 2014). Kompressorilämpöpumppujen tapauksessa prosessiin syötetty lisäteho on sähköä.

$$\dot{W}_{lp} = \frac{\dot{Q}_{lp}}{COP_{lp}} \quad (40)$$

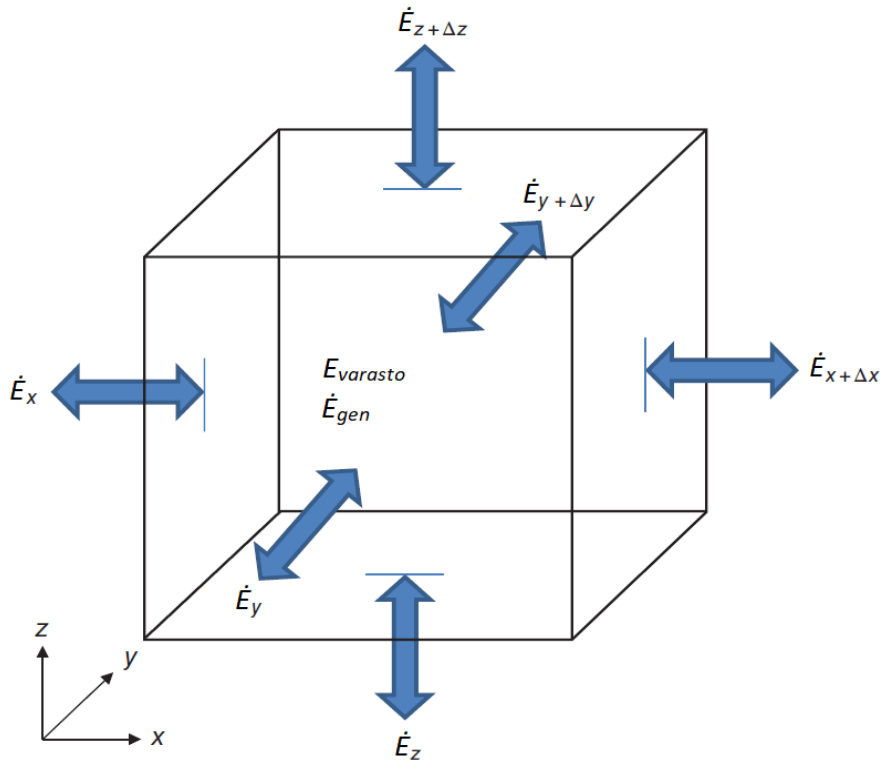
Edellä esitetyt laskentaperiaatteet pätevät mille tahansa kompressorilämpöpumpun sovellukselle. Maalämpöpumpun tapauksessa COP-arvon ja sille ominaisten energiavirtojen määrittäminen vaatii lisäksi maalämmön keruupiiristä saatavan lämmönsiirtonesteen lämpötilan tuntemista. Tämä lämpötila puolestaan riippuu lämmönkeruupiirin

ominaisuuksista ja mitoituksista sekä maaperän lämpötilatasoista. Lämmönkeruupiiri itsessään on lämmönsiirrin, jonka tarkoituksena on siirtää energiaa maaperän ja kentässä kiertävän lämmönsiirtonesteen välillä. Käytännössä keruupiiri voidaan rakentaa useilla eri tavoilla, mutta tässä työssä tarkastelu keskittyy pääasiassa niin sanottuun porakaivokenttään, jolla tarkoitetaan usean yhteen liitetyn, maalämmön hyödyntämiseen tarkoitetun porakaivon muodostamaa lämmönkeruupiiriä. (Chiasson 2016, s. 181-218) Kuvassa 7 esitetään tyypillisen porakaivokenttään ja lämpöpumppuun perustuvan maalämpöjärjestelmän periaatekytkentä.



*Kuva 7. Maalämpöpumpun kytkentäperiaate.*

Maalämmön keruupiirin mitoituksen kannalta on tärkeää tarkastella maalämpövarannon käyttäytymistä koko järjestelmän elinkaaren aikana. Geoterminen energia on todellisuudessa maahan varastoitunutta energiaa, eikä se siten ole ehtymätön energian lähde. Esimerkiksi tietylle kuormalle liian pieneksi mitoitettu lämmönkeruupiiri voi johtaa maaperän lämpötilatason putoamiseen ja siten lämpöpumpun suoritusarvojen huononemiseen ja maalämmön käytettävyyden rajoittumiseen tai jopa estymiseen. Näin ollen keruupiirin mitoituksen tavoitteena onkin varmistaa riittävä energian laatu, eli toisin sanoen lämpötilataso, hankkeen koko elinkaaren ajalle hallitsemalla siihen kohdistuvia energiavirtoja. Maalämpövaranto voidaan ajatella kuvan 8 mukaisena kontrollitilavuutena, johon vaikuttaa eri suuruisia ja suuntaisia energiavirtoja. Yhtälö 41 kuvaa tämän kontrollitilavuuden energiatasetta, joka toimii yleisenä periaatteena siihen kohdistuvien energiavirtojen analysoinnissa. Yleisesti maalämpöratkaisun suunnittelussa tulisi pyrkiä maaperään varastoituneen energian muutoksen minimointiin. (Chiasson 2016, s. 55-80)



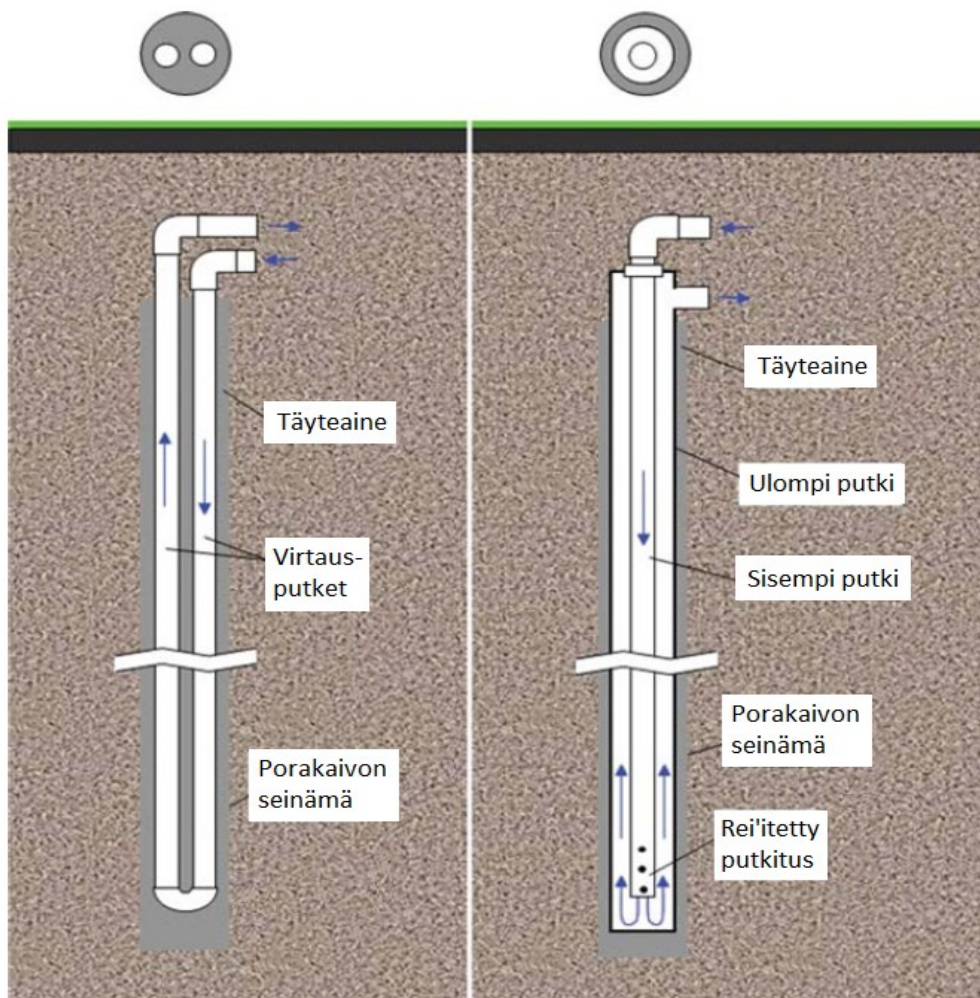
Kuva 8. Maalämpökentän esitys kontrollitilavuutena (mukaillen Chiasson 2016, s. 67).

$$\dot{E}_{\text{sisään}} - \dot{E}_{\text{ulos}} + \dot{E}_{\text{gen}} = \Delta \dot{E}_{\text{varasto}} \quad (41)$$

jossa	$\dot{E}_{\text{sisään}}$	on tilavuuteen sisään tuleva energiavirta [W]
	$\dot{E}_{\text{ulos}}$	on tilavuudesta ulos lähtevä energiavirta [W]
	$\dot{E}_{\text{gen}}$	on tilavuuden sisällä muodostuva energiavirta [W]
	$\Delta \dot{E}_{\text{varasto}}$	on tilavuuteen varastoituneen energian muutos [W]

Maalämpövarannon kontrollitilavuuteen sisään tulevat ja siitä ulos lähtevät energiavirrat aiheutuvat kenttään kohdistuvista kuormista sekä ympäristön kanssa tapahtuvasta lämmönsiirrosta. Kun varantoon kohdistuu lämmitys- tai jäähdytysenergian tuotannon kuormia, syntyy siihen lämpötilagradientti, mikä puolestaan aiheuttaa varannon regeneroitumisen ympäröivästä maaperästä lämmönsiirron periaatteiden mukaisesti. Maalämpövarannon sisällä voi myös muodostua energiavirtoja esimerkiksi radioaktiivisten tai orgaanisten aineiden hajoamisen johdosta. (Chiasson 2016, s. 55-80)

Yleinen tapa toteuttaa maalämmön keruupiiri on hyödyntää lämmön siirtämiseen yhtä tai useampaa pystysuuntaista porakaivoa. Näihin porakaivoihin asennetaan putki, jonka kautta maalämpökentässä kiertävä lämmönsiirtoneste virtaa. Porakaivon kautta virratessaan lämmönsiirtoneste joko vastaanottaa tai luovuttaa lämpöenergiaa maaperään riippuen siitä tuotetaanko lämmitys- vai jäähdytysenergiaa. Usein porakaivoon laitetaan vielä täyteainetta lämmönsiirron tehostamiseksi. Vaihtoehtoisesti porakaivon voidaan antaa täyttyä maaperässä luonnollisesti esiintyvällä vedellä, mikä onkin varsin yleinen käytäntö pohjoismaissa. Suljetuissa maalämpöpiireissä porakaivon virtausputki voidaan toteuttaa kahdella periaatteella. Virtausputkena voidaan käyttää niin sanottua U-putkea tai konsentrista putkea. Näiden periaatteet on esitetty kuvassa 9. (Chiasson 2016, s. 138-180)



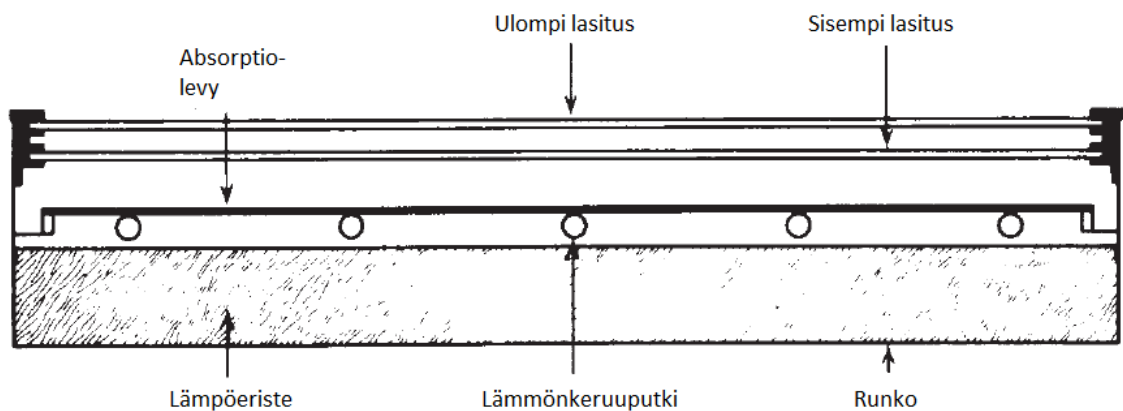
Kuva 9. Maalämmön keruupiirin porakaivot: U-putki (vasemmalla) ja konsentrinen (oikealla) (mukaiillen Chiasson 2016, s. 157).

Tärkeimmät porakaivokentän mitoittamiseen vaikuttavat tekijät ovat maaperän lämpötila, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus, maalämpökenttään kohdistuvat kuormat sekä kentän tekniset ominaisuudet, kuten porakaivojen määrä, syvyys ja lämmönsiirto-ominaisuudet tai keruupiirissä kiertävän lämmönsiirtonesteen massavirta (Chiasson 2016, s. 181-218). Suunnittelulla voidaan vaikuttaa kuormiin ja maalämpökentän teknisiin ominaisuuksiin, mutta ei maaperän lämpötilatasoihin tai lämmönsiirto-ominaisuuksiin. Näin ollen maalämpöhankkeen toteutettavuuden kannalta on erityisen tärkeää tutkia myös maaperässä vaikuttavat olosuhteet etukäteen. Merkittävin tekijä maalämmön potentiaalin kannalta on häiritsemättömän maaperän lämpötila. Tyypillisesti lähellä maan pintaa (noin 5 metrin syvyyteen asti) lämpötila on riippuvainen ulkoilman lämpötilasta, kun taas hieman syvemmällä (noin 5-10 metriä) maaperän lämpötila on lähellä paikkakunnan ulkolämpötilan vuotuista keskiarvoa. Tämän jälkeen syvemmälle mentäessä lämpötila alkaa kohota noudattaen paikkakuntakohtaista lämpötilagradienttia. (Chiasson 2016, s. 55-80) Suomessa tämä lämpötilagradientti on tyypillisesti melko pieni, noin 8-15 °C/km (Kukkonen & Valjus 2006).

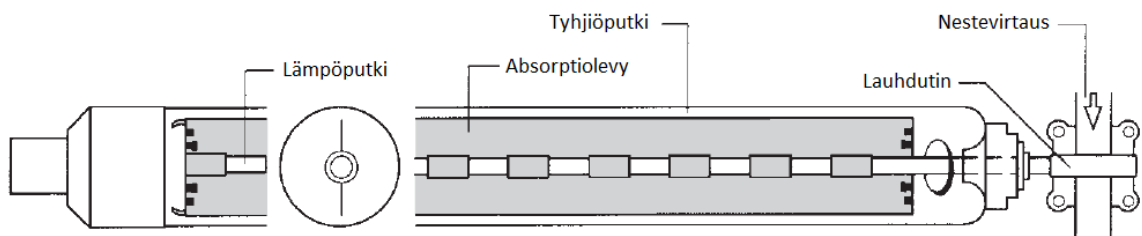
Maalämmön keruupiiristä saatavan lämmönsiirtonesteen lämpötilaan vaikuttaa siis useat tekijät, minkä seurauksena sen määrittäminen ei ole usein kovinkaan yksiselitteistä. Toisaalta se on myös yksi maalämpöön liittyvistä suunnitteluarvoista, joka voidaan, ja usein myös halutaan valita tiettyjen rajoitteiden puitteissa. Lämmönsiirtonesteen mitoituslämpötila puolestaan vaikuttaa lämmönkeruupiirin kokoon, minkä seurauksena sopivan ratkaisun löytäminen vaatii usein iterointia. Lisäksi lämmön keruun käyttäytymisen tarkastelu vaatii monimutkaisten, lämmönsiirtoilmiöitä kuvaavien matemaattisten yhtälöiden ratkaisua, minkä johdosta mitoituksessa turvaudutaankin usein tietokoneavusteisiin simulointityökaluihin. (Chiasson 2016, s. 181-218) Vaikka maalämmön keruupiiriin ja maaperään liittyvät mallinnukset ovat tärkeä osa järjestelmän toiminnan analysointia, ei näitä simuloitajia ole tässä työssä toteutettu aikataulullisista syistä johtuen.

#### 4.4 Aurinkolämpö

Aurinkokeräin on lämmönsiirrin, joka muuntaa auringosta tulevan säteilyn sisältämän energian hyödylliseksi lämmöksi. Yleisimmin käytössä olevat aurinkokeräimet ovat joko niin kutsuttuja tasokeräimiä tai tyhjiöputkikeräimiä. Kolmatta tyyppiä, keskittäviä aurinkokeräimiä käytetään harvemmin ja yleensä vain voimalaitoskokoluokan järjestelmissä. Kuvassa 10 on esitetty tyypillinen tasokeräimen poikkileikkaus. Kuva 11 puolestaan esittää lämpöputkitekniikkaan perustuvan tyhjiöputkikeräimen yksittäisen tyhjiöputken rakennetta. Yhdessä keräimessä on aina useita tyhjiöputkia. Myös sellaisia tyhjiöputkikeräimiä, jossa itse lämmönsiirtoneste kiertää tyhjiöputken kautta, on saatavilla. (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319) Tämän työn tarkasteluissa keskitytään pääosin tasokeräimiin, mutta myös tyhjiöputkikeräinten toimintaperiaatteet esitetään lyhyesti.



Kuva 10. Tasokeräimen poikkileikkaus (mukaillen Duffie & Beckman 2013, s. 237).



Kuva 11. Eräs tyhjiöputken rakenne (mukaillen Duffie & Beckman 2013, s. 276).



Tyypillisen tasokeräimen tärkeimmät komponentit ovat auringon säteilyn absorboiva pinta eli niin kutsuttu absorptiolevy, lämmönkeruuputket, katelasitus, lämpöeriste ja keräimen runko. Katelasituksen ja absorptiolevyn väliin jää liikkumaton ilmakerros, jonka tarkoituksena on pienentää konvektion ja säteilylämmönsiirron seurauksena tapahtuvia lämpöhäviöitä ympäristöön. Katelasitus pyritään valitsemaan siten, että se läpäisee mahdollisimman paljon keräimelle tulevaa lyhytaaltoista säteilyä ja mahdollisimman vähän absorptiolevyn emittoimaa pitkäaaltoista säteilyä. Absorptiolevyyn kerääntynyt lämpö kuljetetaan käyttökohteeseen lämmönkeruuputkistossa virtaavan lämmönsiirtonesteeseen avulla. Tasokeräimen lämpöeristykseen tarkoituksena on puolestaan pienentää lämmön johtumisen aiheuttamia häviöitä. (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319)

Lämpöputkitekniikkaan perustuva tyhjiöputkikeräin puolestaan koostuu useista tyhjiöputkista, jotka sisältävät niin kutsutun lämpöputken ja siihen yhdistetyn absorptiolevyn. Lämpöputken sisällä oleva neste höyrystyy lämpöputken höyrystinosassa, jossa se vastaanottaa absorptiolevyyn kerääntynyttä auringon säteilyn energiaa. Höyry lauhtuu nesteeksi lämpöputken yläosassa sijaitsevassa lauhduttimessa, jossa se luovuttaa energiaa lämmönkeruuputkessa virtaavalle lämmönsiirtonesteelle. Lämpöputken sisällä olevan nesteen höyrystymisen ja lauhtumisen syklin toiminta perustuu kaasufaasin ja nestefaasin välisiin tiheyseroihin. Tyhjiöputken sisälle luodun tyhjiön tarkoitus on toimia lämmön eristeenä. (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319)

Aurinkokeräimen tuottaman lämpöenergian laskemiseksi täytyy ensin selvittää, kuinka suuri säteilyvoimakkuus siihen osuu kullakin ajanhetkellä. Mielivaltaiseen suuntaan osoittavalle tasaiselle pinnalle osuvan säteilyvoimakkuuden laskentaperiaatteet on esitetty aiemmin tässä työssä luvussa 3.3.4 rakennusten energialaskentamallin yhteydessä. Samoja laskentaperiaatteita sovelletaan nyt myös aurinkoenergian tuotannon tarkasteluissa. Kun aurinkokeräimen pinnalle osuva säteilyvoimakkuus on saatu selville, siirrytään laskemaan siitä saatavan hyödyllisen lämpöenergian määrää. Laskennassa lähdetään useimmiten liikkeelle tasokeräimen tasapainotilan energiataseesta, joka kirjoitetaan yleisesti seuraavaan muotoon (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319).

$$\dot{Q} = A[(\tau\alpha)I - U_L(T_{pm} - T_u)] \quad (42)$$

jossa	$\dot{Q}$	on aurinkokeräimestä saatava hyödyllinen lämpöteho [W]
	$A$	on aurinkokeräimen pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
	$I$	on aurinkokeräimen pinnalle osuva säteilyvoimakkuus [W/m <sup>2</sup> ]
	$(\tau\alpha)$	on aurinkokeräimelle ominainen transmissio-absorptiotulo [-]
	$U_L$	on kokonaislämpöhäviöitä kuvaava lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> K)]
	$T_{pm}$	on keräimen absorptiolevyn keskimääräinen lämpötila [K]
	$T_u$	on ympäristön lämpötila (useimmiten ulkolämpötila) [K]

Tasokeräimen tuottama hyödyllinen lämpöteho saadaan siis, kun keräimelle osuvasta säteilyvoimakkuudesta vähennetään optisten häviöiden (kuvataan transmissio-absorptiotulon avulla) ja lämpöhäviöiden seurauksena häviävä teho. Ongelmana yhtälön 42 käytössä on kuitenkin se, että aurinkokeräimen absorptiolevyn keskilämpötila on usein vaikea määrittää, sillä se on riippuvainen keräimelle osuvasta säteilystä, keräimen nestekierron ominaisuuksista sekä keräinmallista. (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319) Yhtälö on kuitenkin hyödyllinen tarkastelun lähtökohtana, sillä sen avulla nähdään, mitkä asiat vaikuttavat tasokeräimen tuottamaan lämpötehoon. Yhtälöä 42 voidaan muokata useilla erilaisilla tavoilla käytännöllisempään muotoon tilanteesta ja vaaditusta analyysin tarkkuustasosta riippuen. Erilaisia näkökulmia tasokeräimen energiataseen muotoiluun on käsitelty



yksityiskohtaisesti lähteessä Duffie & Beckman (2013, s. 236-319). Tässä työssä päädyttiin yksinkertaiseen malliin, jossa aurinkokeräimen suorituskky kuvataan mittausten perusteella määritettyjen kertoimien avulla. Tasokeräimen tuottamalle lämpöteholle voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö.

$$\dot{Q} = A[\eta_0 I - a_1(T_m - T_u) - a_2(T_m - T_u)^2] \quad (43)$$

jossa  $\eta_0$  on tasokeräimen mitattu lämpöhäviöiden hyötysuhde [-]  
 $a_1$  on ensimmäisen kertaluokan mitattu lämpöhäviökerroin [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $a_2$  on toisen kertaluokan mitattu lämpöhäviökerroin [W/(m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)]  
 $T_m$  on keräimen lämmönsiirtonesteen keskilämpötila [K]

Tämä laskentamalli on tasokeräimen tasapainotilan energiataseen (eli yhtälön 42) eräs johdannainen, kuitenkin sisältäen muutamia olennaisia eroja. Ensimmäinen näistä on se, että keräimen lämpöhäviöitä tarkastellaan nyt nestekierron keskilämpötilan ja ulkolämpötilan eron funktiona absorptiolevyn keskilämpötilan ja ulkolämpötilan eron sijaan. Tämän lisäksi kokonaislämpöhäviöitä kuvaavan kertoimen oletetaan riippuvan lineaarisesti nestekierron keskilämpötilan ja ulkolämpötilan erosta, mistä seuraa yhtälön kaksi lämmönsiirtokerrointa,  $a_1$  ja  $a_2$ . (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319) Keräimen optisia häviöitä kuvataan puolestaan lämpöhäviöttömällä hyötysuhteella. Todellisuudessa optiset häviöt ovat keräimen ominaisuuksien lisäksi riippuvaisia myös säteilyn osumakulmasta (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319). Osumakulman vaikutus voitaisiin ottaa huomioon yhtälössä 43 lisäkertoimen avulla, mutta tämä on päätetty jättää tässä tapauksessa huomioimatta mallin yksinkertaistamiseksi.

Edellä esitetty variaatio tasokeräimen energiataseesta on yhteensopiva standardin SFS-EN ISO 9806 (2017) mukaan määritettyjen kokeellisten kertoimien kanssa, joten sitä käyttäessä tulisi varmistaa, että kertoimet on määritetty kyseisistä standardia noudattaen. Tällöin laskelmissa tulisi myös käyttää aurinkokeräimen bruttopinta-alaa. Lisäksi keräimen lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan määrittystapaan tulee kiinnittää huomiota. Käytännön sovelluksissa päästään riittävään tarkkuuteen, kun keskilämpötila määritetään keräimeen sisään menevän nesteen lämpötilan ( $T_{ci}$ ) ja siitä ulostulevan nesteen lämpötilan ( $T_{co}$ ) aritmeettisena keskiarvona, vaikka todellisuudessa tämä ei pitäisikään täysin paikkaansa (Duffie & Beckman, 2013, s. 236-319).

$$T_m = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \quad (44)$$

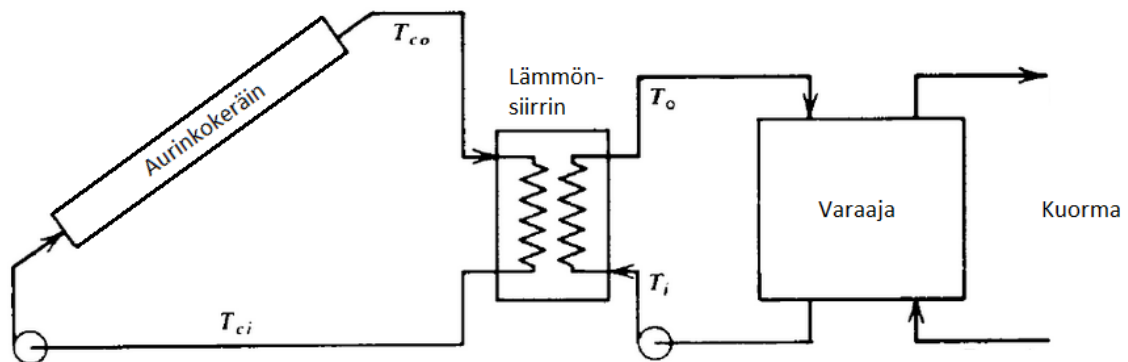
Lisäksi aurinkokeräimiin liittyvissä tarkasteluissa on usein tarpeen määrittää niistä saatava hyödyllinen lämpöteho myös lämmönsiirtonesteen massavirran sekä lämpötilaeron kautta. Yhtälön muodossa tämä on

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{co} - T_{ci}) \quad (45)$$

jossa  $\dot{m}$  on nestekierron massavirta [kg/s]  
 $c_p$  on lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]

Yhtälöitä 43, 44 ja 45 sovellettaessa joudutaan ratkaisu usein iteroimaan, sillä keräimestä saatava teho on riippuvainen sisään menevän sekä ulos tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötilasoista ja vähintään toinen näistä on riippuvainen keräimen tuottamasta tehosta. Vaikka edellä esitetty malli perustuu nimenomaan tasokeräimen energiataseeseen, yleisenä käytäntönä on soveltaa sitä myös muihin keräinteknologioihin, kuten tyhjiöputkikeräimiin liittyviin tarkasteluihin (Duffie & Beckman 2013, s. 236-319).

Yleensä aurinkokeräinjärjestelmän ja lämpökuorman välille on asennettu niin sanottu puskurivaraaja, jonka avulla järjestelmän tuottama energia voidaan hyödyntää tehokkaammin. Usein puskurivaraajan ja keräinjärjestelmän välillä on lisäksi lämmönsiirrin, jotta keräinjärjestelmän lämmönsiirtonesteena voidaan käyttää pakkasnestettä. Tyypillinen aurinkokeräinjärjestelmän kytkentä on esitetty kuvassa 12. Tällaisessa tapauksessa aurinkokeräimelle sisään menevän nesteen lämpötila riippuu puskurivaraajassa vallitsevasta lämpötilasta ja lämmönsiirtimessä tarvittavasta lämpötilaerosta. Varaajan lämpötila täytyy puolestaan laskea sen energiataseen kautta, jolle esitetään eräs laskentamenetelmä luvussa 4.6. Koska keräimen nestekierron lämpötilat vaikuttavat sen tuotannon tehoon, täytyy varaajan ja lämmönsiirtimen vaikutukset ottaa huomioon mallinnuksessa. (Duffie & Beckman 2013, s. 424)



Kuva 12. Aurinkokeräinjärjestelmän tyypillinen kytkentä (mukaiillen Duffie & Beckman 2013, s. 424).

Lisäksi mainittakoon, että tässä luvussa esitetyt aurinkokeräimiin liittyvät laskentamenetelmät perustuvat tasapainotilan yhtälöihin, eikä niiden dynaamisten ominaisuuksien, kuten lämpökapasiteetin roolia ole näin ollen otettu huomioon. Todellisuuden systeemit ovat jatkuvasti muuttuvassa tilassa. Näiden, niin sanottujen transienttien ilmiöiden huomiointi laskennassa monimutkaisiksi mallia kuitenkin huomattavasti, minkä seurauksena ne on nyt jätetty huomiotta. Niinpä laskennan tuloksia tulkitessa on hyvä muistaa, etteivät saadut tulokset välttämättä kuvaa todellista tilannetta täysin tarkasti.

## 4.5 Aurinkosähkö

Lämmön ohella auringon säteilyn sisältämästä energiasta voidaan tuottaa myös sähköä aurinkopaneelien avulla. Aurinkopaneelit ovat laitteita, jotka tuottavat sähköenergiaa auringon valon sisältämästä energiasta. Ne koostuvat sarjaan kytketyistä, puolijohdemateriaalista valmistetuista kennoista, joissa säteilyn sisältämä energia muuttuu sähkövirraksi valosähköisen ilmiön johdosta. Yleisimmin käytössä olevat aurinkopaneelit on valmistettu piikidepohjaisista (c-Si, crystalline silicon) materiaaleista. Muita kaupallisesti saatavilla olevia ratkaisuja ovat erilaisiin ohutkalvomateriaaleihin, kuten kadmium-telluridiin (CdTe) tai kuparin, indiumin ja seleniumin yhdisteeseen (CIS) perustuvat teknologiat. Kullakin teknologialla on omat piirteensä muun muassa sähkön tuotannon tehokkuuden, käyttöiän ja valmistuskustannusten osalta. (Labouret & Viloz 2010, s. 19-110)

Aurinkopaneelien sähkön tuotantotehokkuuteen ja hyötysuhteeseen vaikuttaa useita tekijöitä, joista tärkeimmät ovat paneeliin osuva säteilyvoimakkuus ja sen spektri, aurinkopaneelin kennojen lämpötila sekä aurinkopaneelin pinnan heijastavuus ja sen riippuvuus säteilyn osumakulmasta. Lisäksi on havaittu, että aurinkopaneelien hyötysuhde tyypillisesti heikkenee ajan kuluessa. Aurinkopaneelien tehokkuuteen voivat vaikuttaa myös niihin suoraan liittymättömät ulkopuoliset tekijät, kuten mahdolliset varjostukset, lumipeite tai paneelien likaantuminen. (Huld et al. 2011) Näistä mahdollisimman moni tekijä tulisi ottaa tavalla tai toisella huomioon, kun halutaan selvittää aurinkopaneeleista saatavan hyödyllisen sähköenergian määrä. Huld ja Gracia Amillo (2015) osoittivat, että suurin vaikutus aurinkopaneelin sähkön tuotantotehokkuuteen on siihen osuvan säteilyn voimakkuudella ja kennojen lämpötilalla. Säteilyn spektriin ja paneelin heijastavuuteen liittyvillä ominaisuuksilla todettiin olevan pienempi vaikutus tuotannon tehokkuuteen.

Tämän työn puitteissa aurinkopaneelijärjestelmän tuotannon tehon laskentaan käytetään Huld et al. (2011) kehittämää laskentamenetelmää, jossa tehon oletetaan riippuvan paneelille osuvasta säteilyvoimakkuudesta ja paneelin kennojen lämpötilasta. Kyseinen laskentamenetelmä on käytössä esimerkiksi Euroopan komission ylläpitämässä, aurinkosähkön tuotannon arviointiin tarkoitettussa PVGIS-tietokannassa. Valittu laskentamenetelmä tuottaa esisuunnitteluvaiheeseen riittävän tarkan ja yksinkertaisen mallin aurinkosähkön tuotannolle. Laskennassa oletetaan, että aurinkopaneelien tyyppi, nimellisteho, sijainti ja suuntaus ovat tunnettuja. Käytännössä nämä parametrit ovat helposti määritettävissä jo suunnittelun alkuvaiheessa, minkä johdosta laskentamalli on varsin helppokäyttöinen. Paneeliin osuva säteilyvoimakkuus lasketaan nyt samalla tavalla, kuin aiemminkin, eli luvussa 3.3.4 esitetyllä menetelmällä. Kun paneeliin osuva säteilyvoimakkuus on tiedossa, voidaan sen tuottama sähköteho laskea seuraavan yhtälön mukaisesti (Huld et al. 2011).

$$\begin{aligned} \dot{W}(I', T') = I' \dot{W}_{STC} [1 + k_1 \ln(I') + k_2 (\ln(I'))^2 + k_3 T' + k_4 T' \ln(I') \\ + k_5 T' (\ln(I'))^2 + k_6 T'^2] \end{aligned} \quad (46)$$

jossa  $\dot{W}_{STC}$  on standardoiduissa testiolosuhteissa määritetty nimellisteho ja kertoimet  $k_1 - k_6$  ovat mittausten avulla määritettyjä parametreja, jotka ovat riippuvaisia paneelityypistä. Tässä tutkimuksessa kertoimien  $k$  lukuarvot saadaan lähteistä Huld et al. (2011) ja Euroopan komissio (2017). Kertoimien lukuarvon on esitetty myös taulukossa 2.

*Taulukko 2. Kertoimien  $k_1 - k_6$  lukuarvot (Huld et al. 2011, Euroopan komissio 2017).*

Paneelin tyyppi	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
c-Si	-0,017237	-0,040465	-0,004702	0,000149	0,000147	0,000005
CIS	-0,005554	-0,038724	-0,003723	-0,000905	-0,001256	0,000001
CdTe	-0,046689	-0,072844	-0,002262	0,000276	0,000159	-0,000006

Yhtälössä 46 esiintyvät normeerattu säteilyvoimakkuus  $I'$  ja normeerattu paneelin lämpötila  $T'$  määritetään yhtälöiden 47 ja 48 mukaan. Näissä yhtälöissä  $I_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$  on standarditestauksessa käytetty säteilyvoimakkuus ja  $T_{STC} = 25 \text{ °C}$  on testauksen aikana ylläpidetty paneelin lämpötila. (Huld et al. 2011)

$$I' = \frac{I}{I_{STC}} \quad (47)$$

$$T' = T - T_{STC} \quad (48)$$

Kuten aiemmin jo todettiin, aurinkopaneelin pinnalle osuva säteilyvoimakkuus  $I$  voidaan laskea säätiedoista. Sen sijaan paneelin lämpötila  $T$  on riippuvainen paneelille osuvasta säteilyvoimakkuudesta, paneelin optisista, termisistä ja sähköisistä ominaisuuksista sekä paneelin ja ympäristön välillä tapahtuvasta lämmönsiirrosta. Paneelin lämpötilan laskemiseksi käytetään tässä työssä Faimanin (2008) kehittämää mallia, joka perustuu aurinkokeräimille muodostettuun tasapainotilan lämpötaseyhtälöön. Tämä tarkoittaa sitä, että aurinkopaneelien lämpökapasiteetti ja siitä seuraavat transientit ilmiöt oletetaan merkityksettömiksi. Faiman (2008) esittää aurinkopaneelin lämpötilan  $T$  riippuvan säteilyvoimakkuudesta  $I$ , ulkolämpötilasta  $T_u$  ja tuulen nopeudesta  $v$  seuraavasti.

$$T = T_u + \frac{I}{U_0 + U_1 v} \quad (49)$$

Yhtälössä 49 lämmönsiirtoa kuvaavat kertoimet  $U_0$  ja  $U_1$  saadaan jälleen mittausten perusteella ja ne ovat riippuvaisia paneelityypistä ja paikallisista sääoloista. Tässä työssä erilaisista sääoloista aiheutuvat erot jätetään huomiotta ja lukuarvot määritetään Koehl et al. (2011) tekemän tutkimuksen tulosten perusteella. Käytetyt lukuarvot on esitetty taulukossa 3. Lisäksi mallinnuksessa otetaan huomioon vielä paneelien ikääntymisestä sekä systeemin muista komponenteista aiheutuvat järjestelmähäviöt. Ne määritetään prosentuaalisena osuutena yhtälön 46 mukaan lasketusta paneelien tuottamasta sähkötehosta. Tässä tutkimuksessa järjestelmähäviöille käytetään Euroopan komission (2017) suosittelemaa lukuarvoa, joka on 14 %.

*Taulukko 3. Kertoimien  $U_0$  ja  $U_1$  lukuarvot (Koehl et al. 2011).*

Aurinkopaneelin tyyppi	$U_0$ [W/(°Cm <sup>2</sup> )]	$U_1$ [Ws/(°Cm <sup>3</sup> )]
c-Si	26,92	6,24
CIS	22,61	3,60
CdTe	23,37	5,44

## 4.6 Puskurivaraaja

Joissain tapauksissa lämmitys- tai jäähdytysenergian tuotantolaitosten yhtäjaksoisen käyttämisen tai niiden tuottaman energian tehokaan hyödyntämisen takia tuotannon ja käyttökuorman välille vaaditaan niin kutsuttu puskurivaraaja. Tämä pitää etenkin paikkansa monille sellaisille uusiutuville energiamuodoille, joiden tuotantoprofiili on jaksoittainen ja energian tarpeesta riippumaton. Puskurivaraaja toimii systeemissä ylimääräisenä lämpökapasiteettina, johon voidaan tarpeen mukaan joko varastoida tuotannosta saatavaa energiaa tai, josta voidaan purkaa energiaa vastaamaan kysyntään. Puskurivaraajan tehtävänä on siis tasoittaa sekä kulutuksessa, että tuotannossa tapahtuvia vaihteluita ja näin parantaa koko järjestelmän käytettävyyttä ja tehokkuutta. Edellä esitettyjen seikkojen perusteella puskurivaraajan tarkasteleminen on siis myös tämän työn kannalta olennaista. Näin ollen tässä tutkimuksessa tehtäviä tarkasteluja varten toteutettiin puskurivaraajan laskentamalli seuraavaksi esitettävien periaatteiden mukaisesti.

Puskurivaraajan mallin perustana käytetään tässä tapauksessa täysin sekoittuneen, yhtenäisessä lämpötilassa olevan vesisäiliön energiatasetta. Todellisuudessa vesivaraajaan syntyy aina tiheyseroista johtuva lämpötilajakauma, jossa viileämpi vesi painuu pohjalle ja lämmin vesi nousee pinnalle (Duffie & Beckman, 2013, s. 379-384). Yhden lämpötilan mallin päädyttiin kuitenkin sen yksinkertaisuuden ja helpomman toteutuksen takia. Periaatteet tasaisessa lämpötilassa olevan varaajan mallinnukselle on löydettävissä useista lähteistä, mutta tämän työn tapauksessa varaajan energiataseen yhtälöiden ja perusteiden osalta viitataan lähteeseen Duffie & Beckman (2013, s. 376-379).

Varaajan energiataseessa vaikuttaa kolme eri energiavirtaa: siihen tuleva lämpövirta  $\dot{Q}_{lataus}$ , sekä siitä poistuvat lämpövirrat  $\dot{Q}_{purku}$  ja  $\dot{Q}_{häviö}$ . Lämpövirta  $\dot{Q}_{purku}$  kuvaa varaajasta purettavaa lämpötehoa, jolla pyritään vastaamaan systeemissä esiintyvään lämmön tarpeeseen. Lämpövirta  $\dot{Q}_{häviö}$  puolestaan kuvaa varaajasta ympäristöön tapahtuvia lämpöhäviöitä. Varaajan lämpötila  $T_{var}$  on riippuvainen kaikkien näiden kolmen lämpövirran muodostamasta yhteisvaikutuksesta. Energiataseessa vaikuttavia lämpövirtoja on havainnollistettu myös kuvassa 13, joka kuvaa nyt lämmitystapausta. Jäähdytystapauksessa energiavirtojen suunnat kääntyvät toisin päin, jolloin varaajaa lataamalla vastataan jäähdytystehon tarpeeseen. Yhtälönä energiatase voidaan ilmaista seuraavasti.

$$C \frac{dT_{var}}{dt} = \dot{Q}_{lataus} - \dot{Q}_{purku} - H(T_{var} - T_{ymp}) \quad (50)$$

jossa  $C$  on varaajan lämpökapasiteetti [J/K]  
 $H$  on varaajan lämpökonduktanssi [W/K]  
 $T_{var}$  on varaajan lämpötila [K]  
 $T_{ymp}$  on ympäristön lämpötila [K]

Yleisessä tapauksessa yhtälön 50 ratkaisu tapahtuu integroimalla laskenta-ajan yli. Tämän työn menetelmissä laskenta tapahtuu kuitenkin aika-askeleittain, joten energiataseen ratkaisemiseksi voidaan tässä kohtaa soveltaa luvussa 3.3.2 esitettyä differenssimenetelmää. Tällöin yhtälö 50 voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon.

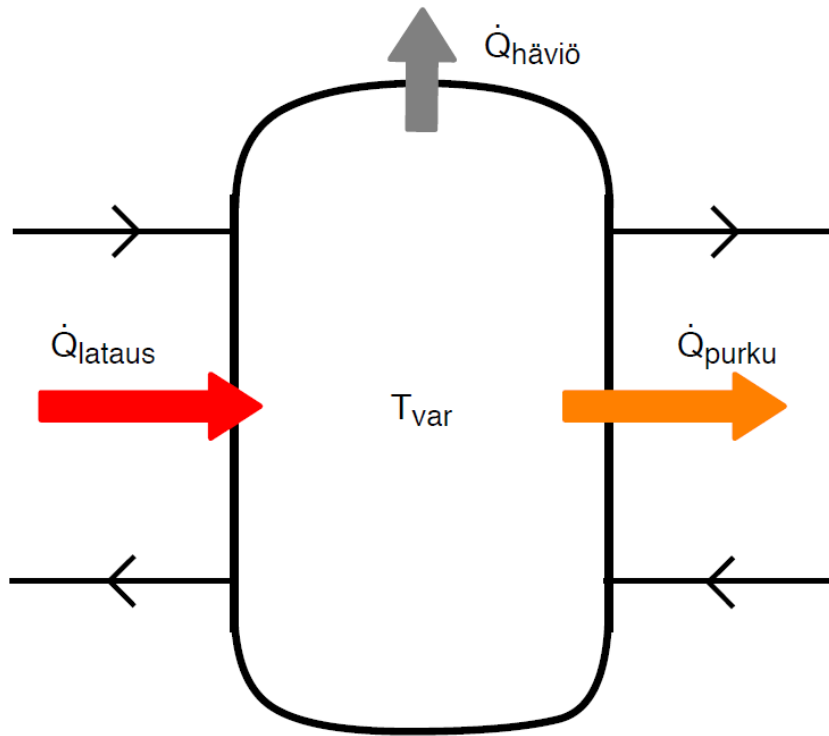
$$C \frac{T_{var}^j - T_{var}^{j-1}}{\Delta t} = \dot{Q}_{lataus}^j - \dot{Q}_{purku}^j - H(T_{var}^j - T_{ymp}^j) \quad (51)$$

jossa indeksi  $j$  kuvaa jälleen laskennan aika-askelta ja  $\Delta t$  aika-askeleen pituutta. Yhtälöstä 51 voidaan ratkaista tilanteesta riippuen joko varaajan lämpötila, tarvittava latausteho tai saatavilla oleva purkuteho, kun muut yhtälön tekijät tunnetaan. Varaajalle ominainen lämpökapasiteetti on yksinkertaisesti varaajan tilavuuden ( $V$ ) sekä sen sisältämän väliaineen ominaislämpökapasiteetin ( $c_p$ ) ja tiheyden ( $\rho$ ) tulo. Tässä tutkimuksessa puskurivaraaja oletetaan vesisäiliöiksi ja sen vaipan lämpökapasiteetti oletetaan merkityksettömän pieneksi. Vesisäiliön vaipan lämpökonduktanssi puolestaan on sen U-arvon ja pinta-alan ( $A$ ) tulo. Yhtälöinä nämä määrittelyt ovat seuraavat.

$$C = \rho V c_p \quad (52)$$

$$H = UA = \frac{A}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u}} \quad (53)$$

Yhtälössä 53 parametri  $\alpha_s$  on säiliön sisäpinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin,  $\alpha_u$  on puolestaan ulkopinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin,  $s$  on varaajan vaipan lämpöeristeen paksuus, ja  $\lambda$  on eristeen lämmönjohtavuus.



*Kuva 13. Puskurivaraajan energiatase (lämmitys).*

Puskurivaraajan tilaa kuvataan usein myös niin sanotun latausasteen avulla, joka on puskurivaraajan sisältämän käytettävissä olevan energiamäärän ja sen maksimiarvon osamäärä. Vesisäiliön tapauksessa latausaste määritetään usein lämpötilatasojen kautta. Tällöin varaajan toiminnalle asetetaan minimi- ja maksimilämpötilat, joiden välissä varaajan todellinen lämpötila liikkuu. Lämmitystapauksessa minimilämpötila asetetaan yleensä vähintään yhtä suureksi, kuin tarvittavan energian lämpötilataso. Maksimilämpötila puolestaan on hieman vapaammin valittavissa ja sillä voidaan vaikuttaa myös säiliön tilavuuden mitoittamiseen. Jäähdytysjärjestelmän puskurivaraajan tapauksessa lämpötilojen roolit kääntyvät jälleen päinvastaisiksi, eli maksimilämpötila määritetään energian tarpeen lämpötilatason mukaan ja minimilämpötilan valinnalla voidaan vaikuttaa varaajan tilavuuden mitoittamiseen.

## 5 Elinkaarikustannukset

Alueellisten energiajärjestelmien kustannustehokkuus on energiatehokkuuden ohella tärkeä kriteeri päätöksenteossa ja suorituskyvyn arvioinnissa. Energiajärjestelmän kustannuksia voidaan tarkastella monista näkökulmista, mutta tässä tutkimuksessa kehitettävän menetelmän kannalta kustannusten arviointi kannattaa suorittaa energiajärjestelmän koko elinkaaren ajalta. Tarkastelun kohteena ovat nyt siis energiajärjestelmän elinkaarikustannukset, joita analysoidaan tässä tapauksessa niin kutsutulla nykyarvomenetelmällä. Seuraavaksi esitetään periaatteet, joita käytetään näiden kustannusten arvioimiseen kehitettävässä analyysimenetelmässä ja laskentatyökalussa.

Rahan arvo ei pysy ajan suhteen vakiona, vaan yleensä sen arvo laskee ajan kuluessa. Niinpä energiataloudellisten hankkeiden oikean arvon määrittämiseksi täytyy niihin liittyvät, eri ajanhetkillä toteutuvat tuotot sekä menoerät muuntaa vastaamaan samaa ajanhetkeä. Energiataloudellisten investointien tapauksessa tämä tapahtuu tyypillisesti nykyarvomenetelmän avulla, jossa tulevaisuudessa tapahtuvat rahavirrat siirretään nykyhetkeen diskonttaamalla. Yleisesti nykyarvomenetelmässä hankkeen kannattavuutta arvioidaan kustannusfunktion avulla, joka voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon. (Sirén 2015b)

$$P = \sum_{j=1}^n \frac{T_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1+i)^j} + \frac{S}{(1+i)^n} \quad (54)$$

jossa  $T_j$  on vuoden  $j$  tuotto [€]  
 $K_j$  on vuoden  $j$  kulut [€]  
 $I_j$  on vuonna  $j$  tehty investointi [€]  
 $n$  on tarkasteluajan pituus [a]  
 $S$  on hankkeen jäännösarvo tarkasteluajan lopussa [€]

$P$  kuvaa nyt hankkeen nykyarvoa. Yleisesti voidaan sanoa, että hanke täyttää laskentakoron kautta asetetun tuottovaatimuksen ja on siten kannattava, mikäli nykyarvo on suurempi tai yhtä suuri kuin nolla. Jos nykyarvo on nolla, hankkeen tuottovaatimus toteutuu täsmälleen ja jos nykyarvo on suurempi kuin nolla, asetettu tuottovaatimus ylittyy. Mikäli nykyarvo on negatiivinen, voi hanke silti olla vielä kannattava, mutta vastaten pienempää tuottovaatimusta tai se voi olla tappiollinen. (Sirén 2015b)

Tuottojen ja menoerien siirto voidaan Sirénin (2015b) mukaan tehdä myös niin kutsuttujen diskonttaustekijöiden avulla, joiden arvoihin energiataloudellisten investointien tapauksessa vaikuttavat nimelliskorko  $i$ , inflaatio  $f$  ja energian hinnan inflaatio eli eskalaatio  $f_e$ . Nimelliskoron ja inflaation avulla voidaan määrittää reaalikorko  $r$ , jolle Sirén (2015) esittää seuraavan yhtälön.

$$r = \frac{i - f}{1 + f} \quad (55)$$

Samalla tavalla voidaan määrittää energian hinnan inflaation huomioiva reaalikorko, mutta tällöin inflaation tilalla käytetään eskalaatiota. Energian hintaa tarkastellessa käytettävä reaalikorko on siis yhtälön 56 mukainen.

$$r_e = \frac{i - f_e}{1 + f_e} \quad (56)$$

Nyt, kun reaalikorot on määritelty, voidaan niitä käyttää jaksollisten suoritusten diskonttaustekijöille määritellyissä yhtälöissä laskentakoron paikalla.

$$a'_n = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (57)$$

$$a''_n = \frac{1 - (1 + r_e)^{-n}}{r_e} \quad (58)$$

Yllä esitetyissä jaksollisten suoritusten diskonttaustekijöiden yhtälöissä muuttuja  $n$  on edelleen tarkasteltavan ajan pituus. Jaksollisella suorituksella tarkoitetaan sellaista tuottoa tai menoerää, joka toistuu saman suuruisena vuodesta toiseen. Yksittäisen suorituksen diskonttaustekijä vuodesta  $j$  nykyhetkeen voidaan puolestaan määrittää yhtälön 59 mukaan. (Siren 2015b)

$$a_j = \frac{1}{(1 + r)^j} \quad (59)$$

Energiataloudellisissa tarkasteluissa tyypillisesti esiintyviä kuluja ovat energiakustannukset, ylläpitokustannukset ja alkuinvestointi. Lisäksi elinkaaren aikana voi esiintyä yksittäiselle ajanhetkelle kohdistuvia investointeja, kuten laitteiston tai sen osan uusimiseen liittyviä hankintoja. Energiakustannukset ja ylläpitokustannukset oletetaan hyvin usein jaksollisiksi suorituksiksi elinkaarikustannusten tarkasteluissa. Mikäli ylimääräistä energiaa kyetään myymään energiayhtiön siirtoverkkoon, on tämä tuottoa. Joissain tarkasteluissa energian säästö voidaan myös tulkita tuotoksi. Tyypillistä energiataloudellisille investoinneille on myös se, että järjestelmällä ei useinkaan katsota olevan jäännösarvoa tarkastelujakson lopussa. (Sirén 2015b) Lisäksi energijärjestelmiin liittyville tarkasteluille on tyypillistä, että tuotot ovat hyvin pienet verrattuna kuluihin. Tästä seuraa, että yhtälöstä 54 laskettu lukuarvo on usein negatiivinen. Niinpä yleensä onkin järkevämpää tarkastella hankkeen nykyarvon sijaan sen elinkaarikustannusten nykyarvoa. Jaksollisten suoritusten diskonttaustekijöiden sekä edellä mainittujen energiataloudellisiin hankkeisiin liittyvien ominaisuuksien ja oletusten perusteella voidaan elinkaarikustannuksille kirjoittaa seuraava yhtälö.

$$P = -a''_n T_e + a''_n K_e + a'_n K_h + \sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1 + r)^j} \quad (60)$$

jossa  $T_e$  on vuotuinen energian myynnistä tai säästöstä saatava tuotto [€]

$K_e$  on vuotuinen energian ostokustannus [€]

$K_h$  on vuotuinen huolto- ja ylläpitokustannus [€]

Tätä yhtälöä käytetään perustana energijärjestelmien elinkaarikustannusten tarkastelussa tässä työssä kehitettävässä analyysimenetelmässä. Huomion arvoista on, että yhtälöstä 60 laskettu positiivinen lukuarvo tarkoittaa nyt kustannuksia.



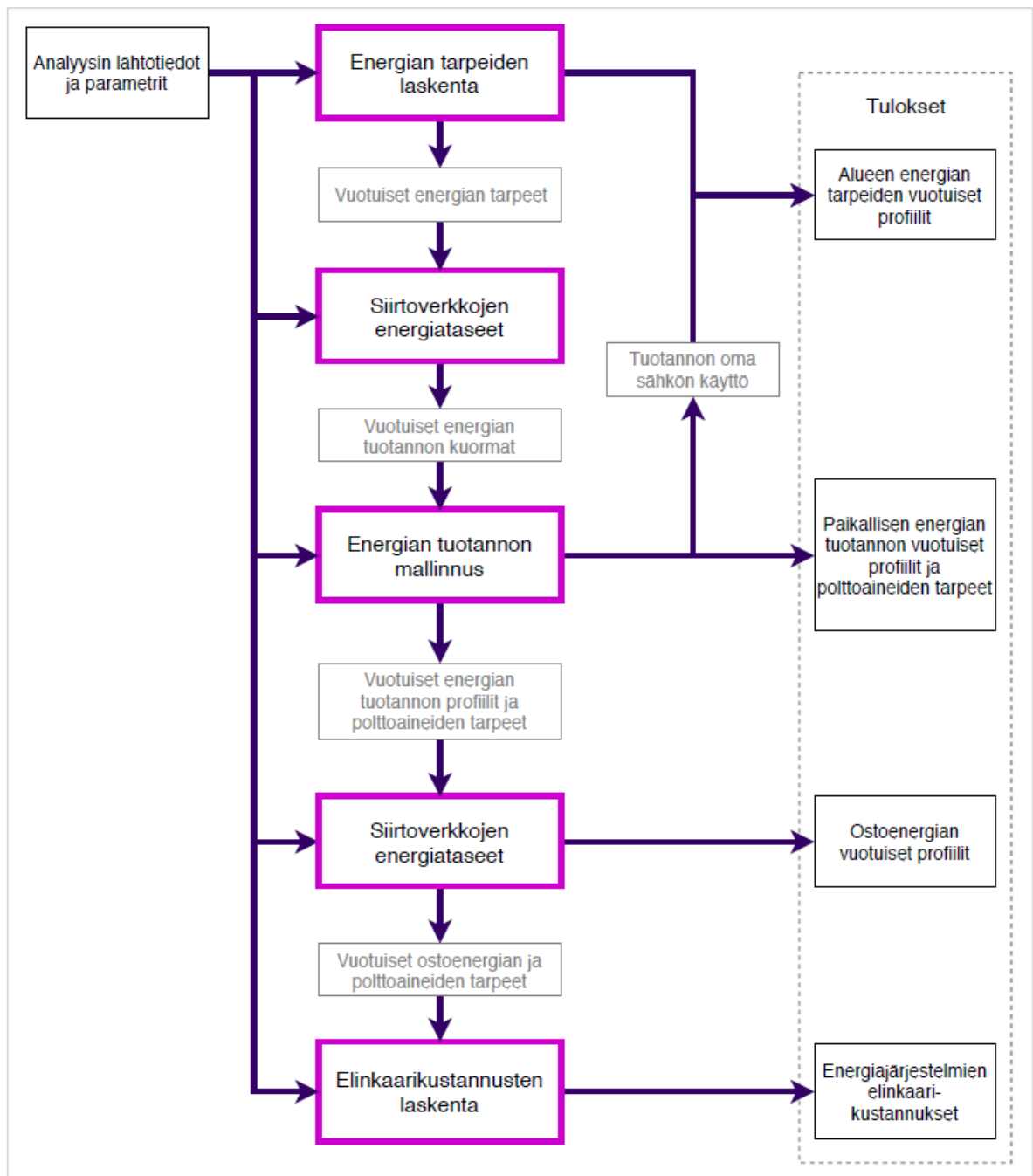
## 6 Analyysimenetelmän kehittäminen

Tämän työn pääasiallisena tarkoituksena oli kehittää analyysimenetelmä ja laskentatyökalu, joka soveltuisi alueellisen hybridienergiaratkaisun suunnitteluprosessin alkuvaiheessa suoritettaviin toteuttamiskelpoisuuteen liittyviin tarkasteluihin sekä erilaisten toteutusvaihtoehtojen vertailuun. Muita menetelmälle ja laskentatyökalulle asetettuja tavoitteita olivat mahdollisimman helppo käytettävyys ja hyvä joustavuus. Tässä tutkimuksessa kehitettyä työkalua sovelletaan ensisijaisesti Levin Koutalaen alueellisen hybridienergiaratkaisun analysointiin, mutta tavoitteena oli, että sitä voitaisiin hyödyntää myös tulevaisuuden hankkeissa. Toisaalta tämän työn tavoitteet olivat osaltaan liitoksissa Levin Koutalaen projektin tavoitteisiin, minkä seurauksena myös menetelmän ja laskentatyökalun kehityksessä on pyritty huomioimaan kyseisen projektin erityispiirteitä. Laskentatyökalu toteutettiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmassa hyödyntäen siihen sisältyviä VBA-ohjelmoinnin ominaisuuksia. Tähän ratkaisuun päädyttiin laskentatyökalulle asetettujen tavoitteiden ja työn tekijän oman osaamisen johdosta. Laskentatyökalun tavoitteiden osalta jouduttiin myös tekemään jotain kompromisseja diplomitöihin yleisesti liittyvien laajuus- ja aikarajoitusten johdosta.

### 6.1 Menetelmän yleinen periaate

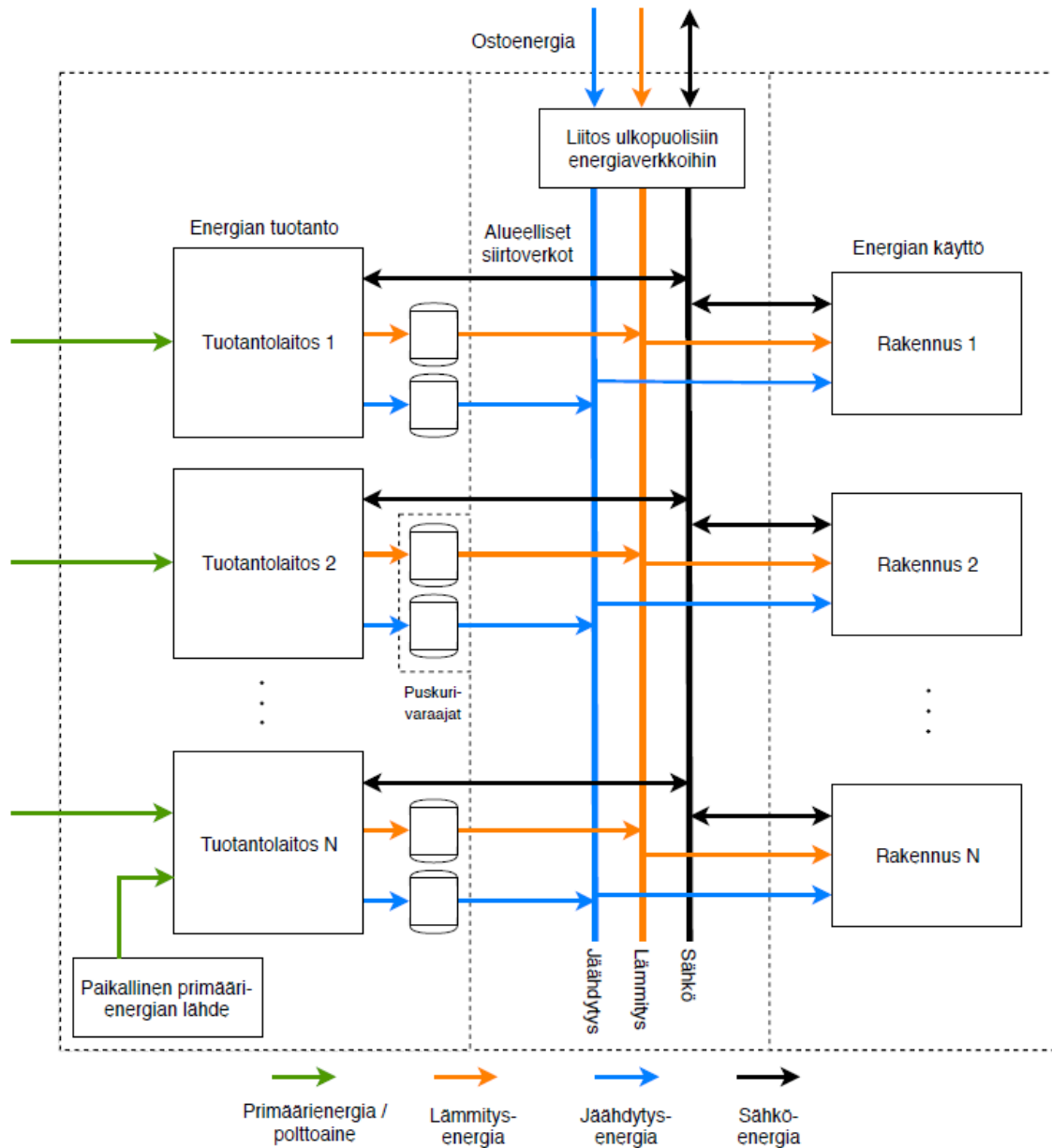
Lähtökohtana kehitettävälle analyysimenetelmälle käytetään Viholainen et al. (2016) esittämää jaottelua, jossa alueellinen hybridienergiajärjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista: energian tarpeista, siirrosta ja tuotannosta. Näitä osa-alueita tarkastelemalla päästään kiinni järjestelmän energiavirtoihin. Tämän työn tavoitteena oli kuitenkin myös järjestelmän taloudellinen tarkastelu, minkä takia analyysimenetelmään täytyy lisätä vielä yksi tarkastelun osa-alue: elinkaarikustannuslaskenta. Kehitettävään analyysimenetelmään kuuluu nyt siis neljä toisistaan erotettavaa tarkastelun osa-aluetta. Yhdessä nämä muodostavat tässä työssä asetettujen tavoitteiden kannalta toimivan menetelmän tarvittavien esisuunnitteluvaiheen tarkastelujen tekemiseen.

Kuvassa 14 on esitetty analyysimenetelmän pääperiaate. Kuten nähdään, jokainen tarkastelun osa-alue vaatii tiettyjen parametrien ja lähtöarvojen määrittämistä ennen varsinaista analyysia. Käytännössä nämä parametrit ja lähtöarvot ovat luvuissa 2 – 5 esitettyihin laskentamenetelmiin liittyviä muuttujia ja lukuarvoja. Ensimmäinen askel itse analyysissa on tarkasteltavan alueen energian tarpeiden laskenta. Tässä tapauksessa energian tarpeilla tarkoitetaan lämmitys- jäähdytys- ja sähköenergian tarpeita. Tämän laskennan jälkeen tuloksena saadaan alueen energian käyttäjien muodostamat vuotuiset energian tarpeen profiilit. Nämä profiilit siirretään tämän jälkeen lähtötiedoiksi siirtoverkkojen energiataseiden analyysiin, josta tuloksena saadaan energian tuotantoon kohdistuvat kuormat. Kun nämä ovat tiedossa, voidaan siirtyä mallintamaan energian tuotantolaitosten toimintaa. Näistä mallinnuksista tuloksena saadaan paikallisen energian tuotannon vuotuiset profiilit, joiden avulla voidaan laskea mahdolliset ostoenergian tarpeet siirtoverkkojen energiataseista. Tuotannon mallinnuksista saadaan myös tiedot polttoaineiden kulutuksesta. Näiden lisäksi laskennassa otetaan huomioon tuotantolaitosten oma energian kulutus, joka lisätään aiemmin laskettuihin alueen energian tarpeisiin. Lopuksi lasketaan vielä koko energijärjestelmälle ja sen osille elinkaarikustannukset polttoaineiden ja ostoenergian tarpeiden sekä taloudellisten parametrien perusteella. Lopullisina tuloksina saadaan siis tietoa järjestelmän energiateknisestä ja taloudellisesta suorituskyvystä.



Kuva 14. Analyysimenetelmän periaate.

Analyysimenetelmän, ja siihen liittyvän laskentatyökalun toteutuksen yksinkertaistamiseksi tässä työssä on tehty tiettyjä oletuksia energiajärjestelmän rakenteesta ja toiminnasta. Energiajärjestelmälle oletettu rakenne on esitetty kuvassa 15. Järjestelmässä voi olla mielivaltaisen määrä energian tuotantolaitoksia sekä rakennuksia energian käyttäjinä. Nämä ovat yhdistetty toisiinsa alueellisten energian siirtoverkkojen avulla. Siirtoverkot voivat olla myös liitetty ulkopuolisten toimijoiden energiaverkkoihin. Analyysimenetelmässä sähkö voi liikkua alueellisessa siirtoverkossa kahteen suuntaan, kun taas lämmitys- ja jäähdytysenergiat vain tuotannosta käyttäjille. Tuotantolaitoksen ja siirtoverkon välillä voi olla puskurivaraaja, mikäli näin halutaan. Paikallinen primäärienergia voi olla esimerkiksi maaperästä hyödynnettyä lämpöä tai aurinkoenergiaa. Alueen ulkopuolelta tuleva primäärienergia on puolestaan pääosin polttoainetta.



Kuva 15. Energiajärjestelmän rakenne analyysimenetelmässä.

Kuten muutamaan otteeseen on jo mainittu, analyysimenetelmän tueksi kehitettiin tämän työn puitteissa Microsoft Excel-pohjainen laskentatyökalu, jolla myös myöhemmin luvussa 7 esitettävät analyysit on pääosin suoritettu. Laskentatyökalussa noudatetaan luonnollisesti myös kuvan 15 mukaista analyysin järjestystä ja luvuissa 2 – 5 esitettyjä laskentaperiaatteita. Kaikki energian tarpeisiin ja tuotantoon liittyvät tarkastelut tehdään laskentatyökalussa tunnin aika-askeleella. Tuloksena saadaan siis tuntikohtaiset energiaprofiilit vuoden ajalta. Elinkaarikustannuslaskennassa aika-askeleena on vuosi. Toisin sanoen energiatarpeista saatuja tuloksia käytetään vuotuisten kustannusten arviointiin, joiden perusteella lasketaan elinkaarikustannukset. Laskentatyökalussa on mahdollista suorittaa myös pelkästään energian tarpeiden tarkastelu tai alueellisen energiajärjestelmän tarkastelu ilman kustannuslaskentaa. Seuraavissa luvuissa esitellään yksittäisten osa-alueiden periaatteita ja toteutusta hieman tarkemmin.

## 6.2 Energian tarpeiden arviointi

Energian tarpeiden laskennan oletuksena on, että energian käyttäjät ovat rakennuksia. Periaatteessa menetelmällä voidaan kuitenkin tarkastella muitakin lämmitys-, jäähdytys- tai sähköenergiaa tarvitsevia kohteita. Itse laskentatyökalussa on kaksi mahdollisuutta energian tarpeiden tarkasteluun. Analyysissa voidaan käyttää työkalun sisään rakennettua yksinkertaistettua rakennusten energialaskentamenetelmää, joka on toteutettu luvussa 3.3 esitettyjen periaatteiden mukaan. Vaihtoehtoisesti energiaprofiilit voidaan tuoda laskentatyökalun ulkopuolisista lähteistä tuntikohtaisena datana. Tämä mahdollistaa esimerkiksi mittausdatan tai kaupallisten energiasimulointiohjelmistojen käytön yhdessä tässä työssä kehitetyn laskentatyökalun kanssa.

Laskentatyökaluun sisältyvässä rakennusten yksinkertaistetussa energialaskentamallissa otetaan huomioon tärkeimmät rakennuksen energian tarpeisiin vaikuttavat tekijät, kuten ulkovaipan rakenteiden pinta-alat ja termodynaamiset ominaisuudet, ilmanvaihdon energiantarpeet ja lämmön talteenotto, vuotoilma, käyttöprofiilit, sääolosuhteet sekä lämpökuormat valaistuksesta, laitteista, käyttäjistä ja auringon säteilystä. Laskentamalli mahdollistaa myös oman käyttöprofiilin luomisen. Tuloksena laskennasta saadaan rakennuksen vuotuiset energian tarpeet erikseen tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksessä sekä tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytyksessä. Näiden lisäksi saadaan rakennuksen sähköenergian tarpeen profiili. Mallin tuloksia voidaan pitää luotettavina yksinkertaisille ja tavanomaisille tapauksille, kuten asuinrakennuksille. Laskentamalliin sisältyvät oletukset ja yksinkertaistukset aiheuttavat kuitenkin laskentavirhettä etenkin suurissa rakennuksissa ja sellaisissa tilanteissa, joissa rakennukseen kohdistuu epätavallisia sisäisiä lämpö- tai kosteuskuormia. Tästä syystä laskentamallin käyttökelpoisuus tuleekin arvioida tapauskohtaisesti.

Laskentatyökalussa voidaan tarkastella useita rakennuksia kerralla ja niiden energian tarpeet summataan lopussa yhteen. Näin muodostuu alueen rakennuskannan energian tarpeiden profiilit, joita käytetään analyysin seuraavissa vaiheissa energiajärjestelmään liittyvissä tarkasteluissa. Laskentatyökalu mahdollistaa myös pelkkien energian tarpeiden tarkastelun ilman alueellisen energiajärjestelmän analysointia.

## 6.3 Energiajärjestelmän mallinnus

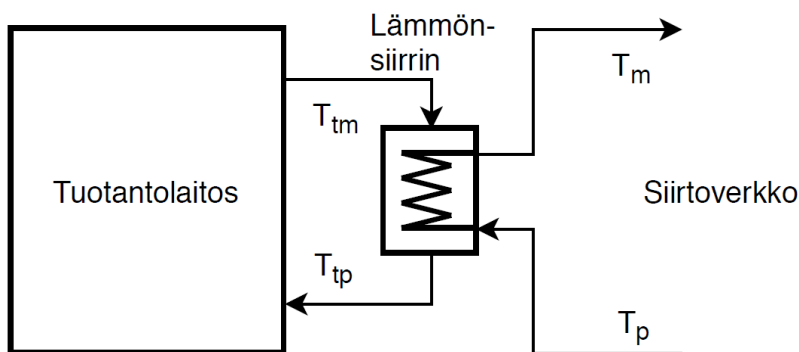
Energiajärjestelmän mallinnus koostuu tässä tapauksessa kolmesta vaiheesta: kahdesta siirtoverkkojen energiataseen tarkastelusta ja tuotantolaitosten mallintamisesta. Energian tarpeiden laskennan jälkeen siirrytään tarkastelemaan alueellisten siirtoverkkojen energiataseita ensimmäisen kerran. Siirtoverkon energiataseen tarkastelun ensimmäisessä vaiheessa ostoenergian tehoksi asetetaan nolla ja sen perusteella lasketaan siirtoverkkoon syötettävän energian tehontarve eli toisin sanoen energian tuotannon kuorma. Tarkastelu tehdään luonnollisesti jokaiselle siirtoverkolle erikseen.

Ensimmäisten siirtoverkkojen energiataselaskelmien jälkeen suoritetaan paikallisten energian tuotantolaitosten mallinnukset, jotka noudattavat luvussa 4 esitettyjä laskentaperiaatteita. Laskentatyökalussa tuotantolaitokset mallinnetaan niille määritetyssä käyttöjärjestyksessä ja tuotannon kuormia päivitetään sitä mukaan, kun laitosten mallinnuksia suoritetaan. Tällä tavoin otetaan huomioon joidenkin tuotantolaitosten vaatimat oman käyttöenergian tehot. Kullekin tuotantolaitokselle on määritetty minimi- ja maksimitehot. Mikäli kuorma ylittää tarkasteltavan laitoksen maksimitehon, käytetään

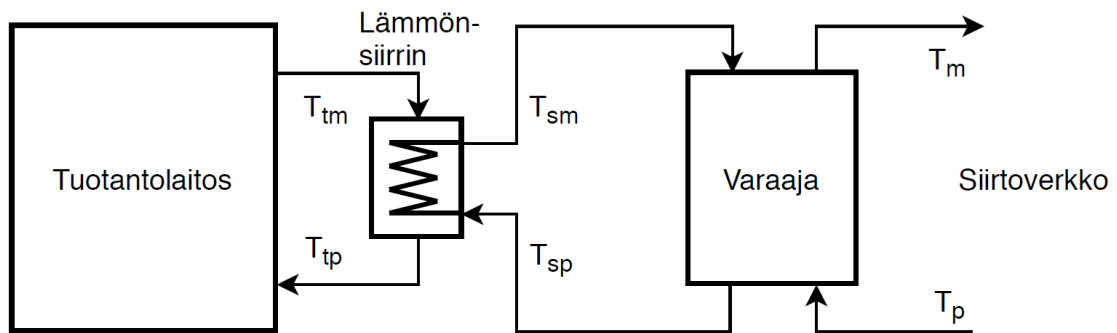
laitosta täydellä teholla ja jäljelle jäävään kuormaan vastataan käyttöjärjestyksessä seuraavilla laitoksilla. Jos kuorma on minimi- ja maksimitehojen välillä, ajetaan laitosta kuorman suuruisella teholla. Tapauksissa, jossa kuorma on tarkasteltavan laitoksen minimitehoa pienempi, ei kyseistä laitosta käytetä ollenkaan, vaan siirrytään tarkastelemaan järjestyksessä seuraavaa laitosta.

Tietyt laitokset pystyvät myös tuottamaan useamman kuin yhden tyyppistä energiaa. Esimerkiksi lämpöpumpulla on mahdollista tuottaa sekä lämmitys-, että jäähdytysenergiaa, jolloin täytyy valita, kumpaa priorisoidaan. Yhteistuotannolla taas tuotetaan sähköä ja lämpöä yhtä aikaa, jolloin mallinnuksessa täytyy valita, kumman kuorman perusteella tuotantoa ohjataan. Mikäli yhteistuotanto seuraa lämmön tarvetta, syötetään sähkön tuotannon teho kokonaisuudessaan alueelliseen siirtoverkkoon ja tarvittaessa ylimääräinen sähkö myydään alueen ulkopuolelle. Jos yhteistuotantoa puolestaan ohjataan sähkön tarpeen perusteella, käytetään tuotetusta lämmöstä sen verran kuin sen hetkiset kuormat sallivat ja mahdollisen ylimääräisen lämmön oletetaan menevän hukkaan. Kun kaikki tuotantolaitokset on käsitelty, asetetaan energian tuotannon profiilit sekä päivitettyt kuormat lähtötiedoiksi siirtoverkkojen energiataseisiin ja lasketaan tarvittavat ostoenergian profiilit.

Joidenkin tuotantomenetelmien, kuten lämpöpumpulla tuotetun energian tai aurinkolämmön tehokkuus riippuu tarvittavista lämpötilatasoista. Niinpä analyysimenetelmässä ja laskentatyökalussa pitää ottaa huomioon myös kuormien vaatimat lämpötilatasot. Tässä tapauksessa ongelma ratkaistaan siten, että lämmityksen ja jäähdytyksen siirtoverkkojen menolämpötiloille määritetään säätökäyrät ulkolämpötilan funktiona. Tuotannolta vaaditut lämpötilat seuraavat siirtoverkon menoveden lämpötiloja siten, että väliin kytketyn lämmönsiirtimen tai puskurivaraajan vaikutus otetaan huomioon. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty laskentatyökalussa käytetyt lämmitys- ja jäähdytysenergian tuotannon ja siirtoverkkojen välisen kytkennän periaatteet. Kummassakin kytkennässä lämmönsiirtimet voidaan jättää huomiotta asettamalla niiden vaatimaksi lämpötilaeroksi  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin tuotanto on käytännössä kytketty suoraan joko siirtoverkkoon tai puskurivaraajaan. Jos tuotanto on kytketty siirtoverkkoon puskurivaraajan kautta, määritetään siltä vaadittu lämpötilataso varaajan lämpötilan ja lämmönsiirtimen vaatiman lämpötilaeron summana. Varaajan lämpötila lasketaan puolestaan sen energiataseesta, joka esitettiin luvussa 4.6. Mikäli puskurivaraajaa ei ole, on tuotannolta vaadittu lämpötilataso verkoston menoveden lämpötilan ja lämmönsiirtimen asteisuuden summa.



Kuva 16. Tuotantolaitoksen kytkentäperiaate lämmitys- tai jäähdytysenergian siirtoverkkoon ilman puskurivaraajaa.



Kuva 17. Tuotantolaitoksen kytkentäperiaate lämmitys- tai jäähdytysenergian siirtoverkkoon puskurivaraajan kautta.

Puskurivaraajan lämpötilan ohjaus toimii tässä tapauksessa kolmella vaihtoehtoisella tavalla riippuen siitä, mitä kukin energian tuotantomenetelmä vaatii. Ohjattavan lämmitys- ja jäähdytysenergian tuotannon tapauksissa oletetaan, että varaajaa voidaan ladata milloin vain ja tiettyjen minimi- ja maksimitehojen puitteissa. Lämmitystapauksessa varaajan lataus käynnistyy, kun sen lämpötila putoaa minimiarvon alapuolelle ja pysyy päällä, kunnes saavutetaan lämpötilan maksimiarvo eli, kun varaaja on täyteen ladattu. Jäähdytystapaus toimii samalla logiikalla, mutta lämpötilojen raja-arvot kääntyvät päin vastoin, eli maksimiarvo tarkoittaa tyhjää varaajaa ja minimiarvo täyttä varaajaa. Kolmannessa tapauksessa lämmöntuotanto on riippumaton kuormasta, kuten esimerkiksi aurinkolämmön tapauksessa. Tällöin varaajaa ladataan aina, kun lämpöä pystytään tuottamaan ja lataaminen on lämpötilatasojen puolesta mahdollista. Varaajan purkaminen tapahtuu niin ikään aina, kun on kysyntää ja purkaminen on latausasteen puolesta mahdollista. Mikäli energiaa voitaisiin tuottaa, mutta varaajan on täynnä, oletetaan tämän energian menevän hukkaan.

Ostoenergian ja tuotannon tehoprofiilien lisäksi energiajärjestelmän mallinnuksista saadaan tulokseksi kunkin tuotantolaitoksen polttoainetehon profiilit. Niiden avulla voidaan tarvittaessa laskea myös polttoaineiden menekit, mikäli tiedetään polttoaineen lämpöarvo. Polttoainetehon profiilit ovat myös yksi elinkaarikustannuslaskennan lähtötiedoista. Kaiken kaikkiaan energiajärjestelmän mallinnuksista saadaan tietoa tuotantolaitosten tehokkuuksista, käyttöajoista ja tehomitoitusten riittävydestä. Lisäksi voidaan tutkia erilaisten käyttöjärjestysten vaikutusta järjestelmään toimintaan.

## 6.4 Kustannuslaskenta

Alueellisen energiajärjestelmän analysoinnin jälkeen suoritetaan koko järjestelmän elinkaarikustannusten laskenta annettujen parametrien perusteella. Energiajärjestelmän tarkastelut suoritettiin vuoden pituisen tarkastelujakson ajalta tunnin aika-askeleella, kun taas elinkaarikustannuslaskenta suoritetaan koko järjestelmän elinkaaren ajalta vuoden aika-askeleella. Lähtötietoina laskennassa käytetään muun muassa energiajärjestelmän tarkasteluista saatuja tietoja vuotuisista polttoaineen kulutuksista ja ostoenergian määristä. Laskennassa oletetaan, että energian tarpeet ja siten myös tuotanto toistuvat samanlaisina vuodesta toiseen ja se suoritetaan luvussa 5 esitetyllä nykyarvomenetelmällä. Tälle menetelmälle ominaisten laskentaparametrien lisäksi määritettäviä lähtötietoja ovat järjestelmien investointi- ja ylläpitokustannukset sekä energian hinnat. Kunkin paikallisen tuotantolaitoksen sekä muiden järjestelmäinvestointien ja ostoenergian aiheuttamat elinkaarikustannukset lasketaan erikseen ja summataan lopussa yhteen.

Itse laskentatyökalussa energian hinnat voidaan määrittää joko tunneittain vaihtuvana dynaamisena hintana tai koko vuoden samana pysyvänä vakiohintana kaikille polttoaineille ja energiatyypeille erikseen. Kunkin energiatyyppin hintakehitys voidaan niin ikään määrittää erikseen. Alkuinvestoinnit oletetaan tehtäväksi tarkastelun nykyhetkenä ja mahdolliset tietyin väliajoin toetutuvat lisäinvestoinnit voidaan myös ottaa laskennassa huomioon. Päätuloksena laskennasta saadaan koko järjestelmän elinkaarikustannusten nykyarvo, joka jaetaan lisäksi kolmeen kategoriaan: investointikustannuksiin, huolto- ja ylläpitokustannuksiin sekä energiakustannuksiin. Energiakustannukset eritellään vielä polttoainekustannuksiin, sekä sähkön, lämmön ja jäähdytyksen ostosta syntyviin kustannuksiin. Lisäksi yksittäisten tuotantolaitosten sekä siirtoverkkojen ynnä muun infrastruktuurin muodostamat kustannukset on mahdollista saada laskennan tuloksena eriteltynä. Elinkaarikustannusanalyysin jälkeen on järjestelmän teknistaloudellisesta suorituskyvystä saatu merkittävä määrä tietoa päätöksen teon tueksi.

## 6.5 Menetelmän kehitys jatkossa

Tässä työssä kehitettiin menetelmä ja laskentatyökalu alueellisen hybridienergiaratkaisun teknistaloudelliseen analysointiin. Tavoitteena oli myös, että työkalu olisi mahdollisimman helppokäyttöinen ja kevyt. Työn aikatauluun ja laajuuteen liittyvien rajoitusten johdosta menetelmässä ja etenkin laskentatyökalussa on kuitenkin useita osa-alueita, joita olisi mahdollista parantaa jatkokehityksellä. Esimerkiksi alueelliseen energian tuotantoon on olemassa monia ratkaisuja, joista vain muutaman mallinnus on toteutettu tässä työssä. Niinpä uusia energian tuotannon teknologioiden mallinnuksia voitaisiin lisätä ja näin parantaa työkalun sovellettavuutta. Lisäksi jatkokehityksessä voitaisiin ottaa huomioon energian tuotanto alueella esiintyvistä hukkaenergian lähteistä, kuten jäähdytyskuormien tai jäteveden sisältämästä energiasta. Myös energian pitkäaikaisen varastoinnin tarkastelumahdollisuuden lisääminen menetelmään ja laskentatyökaluun mahdollistaisi alueellisten ratkaisujen monipuolisemman tarkastelun.

Alueellisen hybridienergiajärjestelmän toteutuksen rakenne on myös periaatteessa aina optimointiongelma, etenkin paikallisen energian tuotannon osalta. Tästä huolimatta tässä työssä toteutettuun menetelmään ja laskentatyökaluun ei sisälly varsinaisia optimointimahdollisuuksia. Sen sijaan esimerkiksi erilaisten tuotannon tehomitoitusten vaikutuksia voidaan tutkia vain tekemällä useita tarkasteluja manuaalisesti. Niinpä yksi selvä kehityskohde olisikin esimerkiksi tuotannon tehomitoitusten optimointialgoritmin lisääminen laskentatyökaluun. Optimoinnin ohella taloudellisten herkkyystarkastelujen tekeminen kehitetyllä analyysityökalulla on tällä hetkellä hieman työlästä. Toisaalta herkkyystarkastelut antavat tyypillisesti arvokasta tietoa järjestelmän kannattavuudesta taloudellisten ennusteiden muuttuessa, minkä takia niitä halutaan usein tehdä. Näin ollen yksi mahdollisen jatkokehityksen tavoite voisi myös olla herkkyystarkastelujen tekemisen mahdollisuuksien parantaminen. Edellä mainittujen kehityskohteiden lisäksi menetelmässä voitaisiin tarkastella myös muita alueellisten hybridienergiaratkaisujen suunnitteluun liittyviä näkökulmia. Esimerkiksi ympäristölle haitallisten päästöjen tai hiilijalanjäljen laskenta voisi olla hyödyllinen lisäys menetelmään. Ennen laajamittaisiin kehitystoimenpiteisiin ryhtymistä tulisi työkalusta kuitenkin kerätä käyttökokemuksia ja arvioida jatkokehityksen tarvetta sekä tulevien hankkeiden, että kaupallisesti saatavilla olevien ohjelmistojen kannalta.

## 7 Levin Koutalaen alueen analyysit

Levin Koutalaen alueelle suunnitellaan hiihtokeskuksen laajennusta, jonka yhteydessä on tarkoitus toteuttaa myös alueellinen hybridienergiajärjestelmä. Tämä hanke toimi lähtökohtana tässä tutkimuksessa kehitetyn analyysimenetelmän ja laskentatyökalun kehityksessä. Seuraavaksi menetelmää sovelletaan Koutalaen hybridienergiaratkaisun analysointiin. Tarkoituksena on todentaa menetelmän toimivuus, sekä saada päätöksentekoa ohjaavaa tietoa Koutalaen hankkeen suunnittelua varten.

### 7.1 Koutalaen alue

Levitunturi sijaitsee Kittilässä lähellä Sirkan kylää. Koutalaen alue puolestaan sijaitsee Levitunturin rinteessä, noin 320 metrin korkeudella meren pinnasta. Korkeusero läheiseen Sirkan kylään on noin 120 m. Alue on noin puolivälissä Levin hiihtokeskuksen eturinteessä. (Sorvari 2015) Koutalaen koordinaatit ovat noin  $67,8^\circ$  pohjoista leveyttä ja  $24,8^\circ$  itäistä pituutta. Alueella on jo olemassa olevaa rakennuskantaa, joka aiotaan yhdistää sinne rakennettavaan alueelliseen energiajärjestelmään. Kongressikeskus Levi Summitin kerrospinta-ala on noin  $3500 \text{ k-m}^2$  ja Levi Panorama hotellin pinta-ala on noin  $15500 \text{ k-m}^2$ . Lisäksi alueella on lomaosakkeita tarjoava Levi Chalets, mutta tämän liittäminen alueelliseen järjestelmään ei tässä työssä ole tarkasteltu.

Alueellisen lämmitysenergian siirtoverkon lämpötilatasojen takia täytyy tarkastella olemassa olevien rakennusten LVI-järjestelmiä. Alueellisen siirtoverkon osalta tavoitteena on toteuttaa se mahdollisimman alhaisilla toimintalämpötiloilla. Levi Panoraman pääasiallinen lämmitysjärjestelmä on lattialämmitys, mikä sopii hyvin matalan lämpötilan järjestelmiin. Levi Summitia lämmitetään puolestaan pääosin vesikiertoisilla radiaattoreilla. Summitin lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat  $70^\circ\text{C}$  menovedelle ja  $40^\circ\text{C}$  paluuedelle. Radiaattoriverkoston lämpötilatasojen alentamisen potentiaalia joudutaankin mahdollisesti tutkimaan alueellisen energiajärjestelmän suunnittelun yhteydessä. Toisaalta korkeimpia lämpötiloja tarvitaan vain pahimmilla pakkasilla, jolloin yksi ratkaisu voisi olla käyttää näinä hetkinä rakennuskohtaista lisälämmitystä. Kummatkin kohteet tarvitsevat lisäksi ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitystä. Tällä hetkellä lämmitysenergia rakennuksille toimitetaan kaukolämpönä, joka tuotetaan Sirkan kylässä sijaitsevassa Adven Oy:n voimalassa. Sekä Levi Panoramassa, että Levi Summitissa on lisäksi ilmanvaihdon jäähdytysjärjestelmät, joiden tarvitsema energia tuotetaan sähköllä rakennuskohtaisilla vedenjäähdyttimillä.

Tulevaa uutta rakennuskantaa Koutalaen alueelle on suunniteltu yhteensä noin  $46560 \text{ k-m}^2$ , jotka ovat suurimmaksi osaksi majoitusliiketoimintaa palvelevia rakennuksia. Tähän kuuluu noin  $2750 \text{ k-m}^2$  verran niin sanottuja villoja, jotka ovat rivitalotyypisiä, vierailijoille tarkoitettuja majoitusrakennuksia. Tarkemmat tiedot näistä esitetään myöhemmin niiden energialaskelmien yhteydessä. Noin  $43000 \text{ k-m}^2$  verran pinta-alaa on varattu kylpylähotellille ja muille majoitusliikerakennuksille. Viimeisimpien suunnitelmien mukaan tämä kompleksi koostuisi useasta hotellisiivestä, joista yksi sisältäisi edellä mainitun kylpylän. Tähän pinta-alaan kuluu lisäksi maanalaisia tiloja. Lopuksi rakennuskantaan kuuluu vielä noin  $807 \text{ k-m}^2$  kokoinen hybridienergiakeskus. Kaikissa uusissa rakennuksissa on tarkoitus käyttää matalassa lämpötilassa toimivia lämmitysjärjestelmiä, kuten lattialämmitystä.



Koutalaen alueellisen järjestelmän vaatima energia on tarkoitus tuottaa edellä mainitussa hybridienergiakeskuksessa. Käytännössä se on laitos, jonne alueen paikalliset energian tuotantoyksiköt on keskitetty. Hybridienergiakeskuksen tuotantoyksikköihin kuuluu tämän hetkisten suunnitelmien mukaan metsähaketta polttava lämpökattila, kaksi hakekäyttöistä pienen mittakaavan sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksikköä, maalämpöpumppu, kevyttä polttoöljyä käyttävä lämpökattila ja 100 m<sup>2</sup> joko aurinkopaneeleja tai -keräimiä. Hakekattila ja sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksiköt on tarkoitettu perustuotannoksi, kun taas maalämpö ja öljykattila on mitoitettu huippu- ja varatuotannoksi. Alueellisista siirtoverkoista on tarkoitus rakentaa ainakin lämmitysverkko ja mahdollisesti myös sähköverkko. Tämän järjestelmän ja muutaman vaihtoehtoisen ratkaisun ominaisuuksia tarkastellaan myöhemmin tässä luvussa.

## **7.2 Koutalaen alueen energian tarpeet**

Koutalaen alueelliseen energiajärjestelmään liitettävien rakennusten energian tarpeiden arvioinnissa käytetään tässä tutkimuksessa useita toisistaan poikkeavia menetelmiä. Kiteytettynä voidaan sanoa, että nykyisten rakennusten energian tarpeet määritetään mittaustietojen avulla, kun taas tulevien rakennusten osalta käytetään energiasimuloinneista saatuja tuloksia. Koska alue rakentuu useassa vaiheessa, on joistain rakennuksista käytössä toisia tarkemmat suunnitelmat. Näin ollen myös tulevan rakennuskannan energian tarpeiden määrittämiseen käytetään erilaisilla simulointimenetelmillä saatuja tuloksia. Rakennusten energian tarpeiden analyysissa saadut tulokset sekä analyysin lähtökohdat ja –tiedot esitetään tässä luvussa.

### **7.2.1 Nykyisen rakennuskannan energian tarpeet**

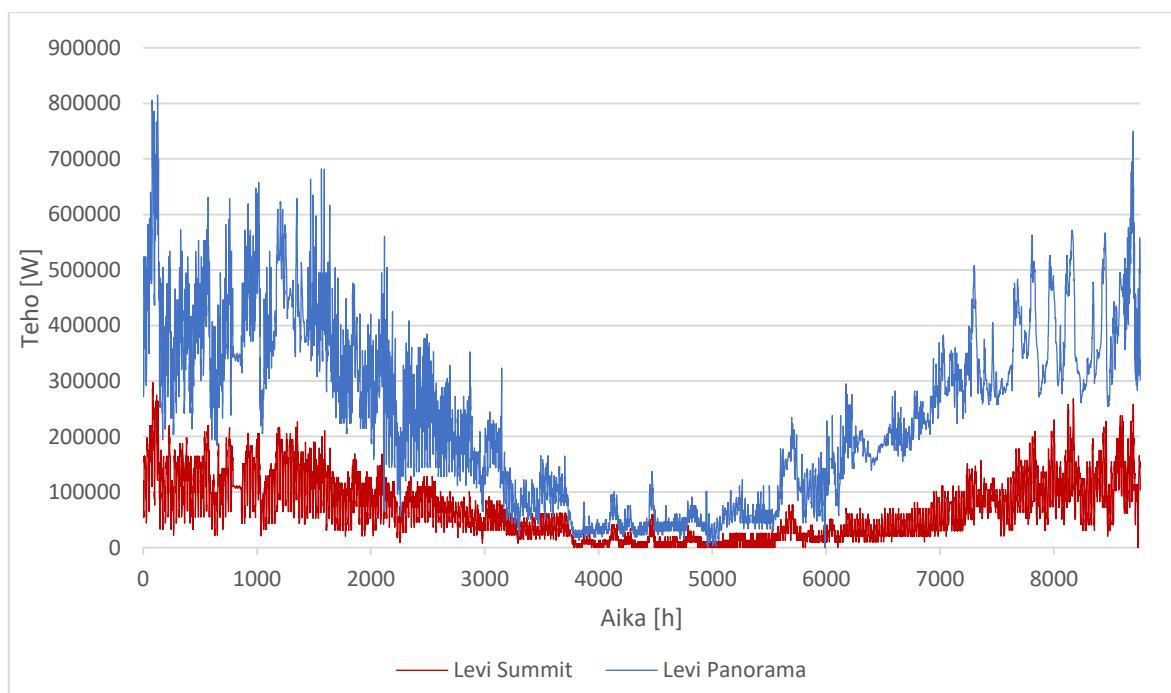
Olemassa olevien rakennusten energian tarpeet määritetään tässä tapauksessa vuoden 2017 mittaustietojen perusteella. Käytössä on kaukolämpöyhtiöltä saatu tuntikohtainen mittarilukema, tuntikohtainen sähkönkulutuksen mittarilukema sekä kuukausikohtainen kylmän veden kulutustieto. Nämä tiedot ovat olemassa erikseen Levi Panoramalle ja Levi Summitille. Lisäksi mainittakoon, että kaukolämmön mittaustiedoissa esiintyy jaksoja, jolloin mittaria ei ole pystytty lukemaan. Näiden jaksoiden aikana kaukolämmön kulutus on ensin yhtäjaksoisesti nolla, minkä jälkeen kyseisen jakson aikana käytetty energia esiintyy ylisuurena piikkinä aikajakson viimeisen tunnin mittaustiedossa. Tällaisissa tapauksissa mittaustiedot on muokattu siten, että viimeisellä tunnilla esiintyvä kulutuspiikki on jaettu aikajakson kaikille tunneille ulkolämpötilan mukaan painottaen. Näin on pyritty saamaan aikaan mahdollisimman todenmukainen lämmön käyttöprofiili vaillinaisesta mittaustiedosta huolimatta.

Kuukausittaisten veden kulutustietojen avulla voidaan arvioida lämpimän käyttöveden osuus olemassa olevien rakennusten kokonaislämmönkulutuksesta. Tässä tapauksessa oletetaan, että lämpimän käyttöveden kulutus on puolet käyttöveden kokonaiskulutuksesta ja, että sen lämpötilaa täytyy nostaa 50 °C. Kuukauden aikana lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetty energia jaetaan tuntikohtaiseksi profiiliksi siten, että se mukaillee kaukolämmön kokonaiskulutuksen profiilia. Toisin sanoen käyttöveden lämmitykseen käytetty energia painotetaan lämmitysenergian kokonaistarpeen profiilin mukaan. Käyttöveteen ja sen lämmitykseen liittyvät kulutustiedot Panoran ja Summitin osalta on esitetty taulukossa 4.

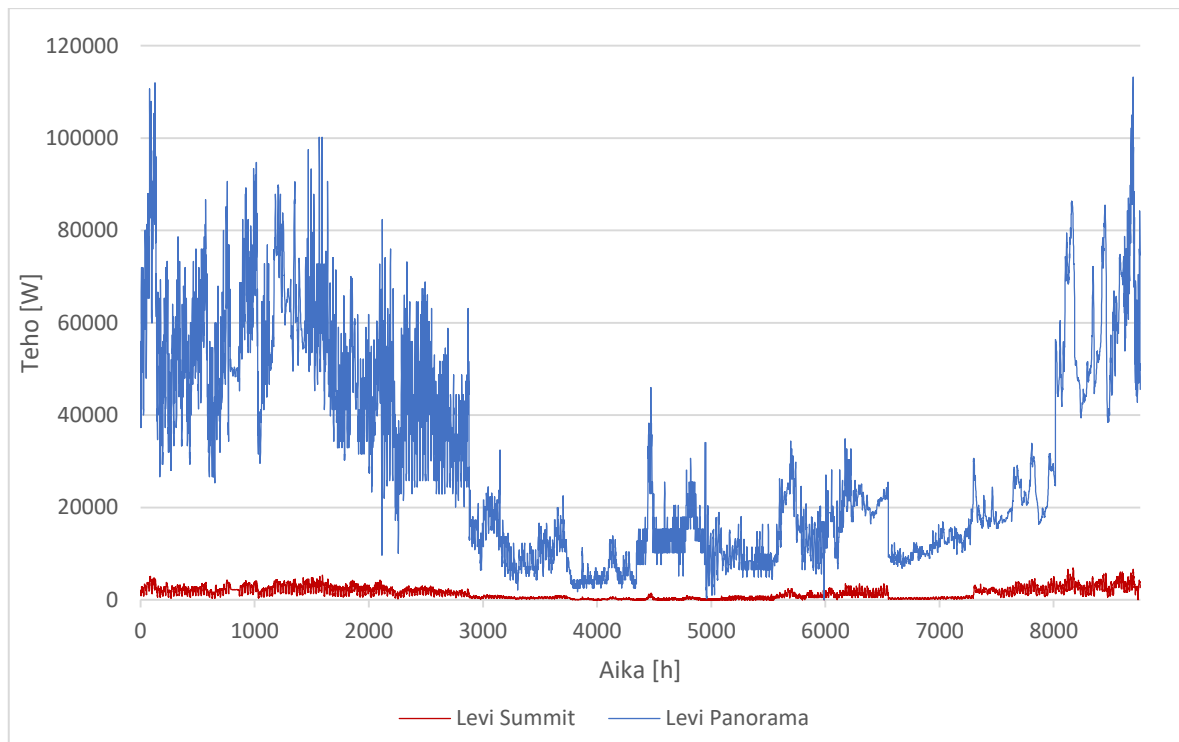
Taulukko 4. Levi Panoraman ja Levi Summitin käyttöveden kulutustiedot vuodelta 2017.

Kuukausi	Käyttöveden kulutus [m <sup>3</sup> ]		Lämpimän veden kulutus [m <sup>3</sup> ]		Käyttöveden lämmitys [MWh]	
	Panorama	Summit	Panorama	Summit	Panorama	Summit
tammi	1373	56	686,5	28	40,05	1,63
helmi	1257	57	628,5	28,5	36,66	1,66
maalis	1290	62	645	31	37,63	1,81
huhti	950	41	475	20,5	27,71	1,20
touko	303	13	151,5	6,5	8,84	0,38
kesä	167	6	83,5	3	4,87	0,18
heinä	320	6	160	3	9,33	0,18
elo	357	15	178,5	7,5	10,41	0,44
syys	417	33	208,5	16,5	12,16	0,96
loka	290	9	145	4,5	8,46	0,26
marras	551	54	275,5	27	16,07	1,58
joulu	1644	78	822	39	47,95	2,28
<b>yhteensä</b>	<b>8919</b>	<b>430</b>	<b>4459,5</b>	<b>215</b>	<b>260,14</b>	<b>12,54</b>

Taulukossa 4 esitettyjen arvojen perusteella lasketut käyttöveden lämmityksen energiaprofiilit vähennetään rakennusten kaukolämmön kokonaistarpeiden profiileista, jolloin saadaan tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksessä tarvittavan energian käyttöprofiilit. Koska kyseessä on tietyn vuoden mittaustiedot, täytyy tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen energiaprofiilit vielä normittaa lämmitystarvelukujen avulla. Tässä tapauksessa normituksessa käytetään Sodankylän vuoden 2017 kuukausittaisia lämmitystarvelukuja sekä vertailukauden 1981-2010 lämmitystarvelukuja (Ilmatieteen laitos 2019). Normituksen myötä olemassa olevien rakennusten energiaprofiilit edustavat tarkemmin tyypillistä vuotta ja ovat siten paremmin vertailtavissa myöhemmin tässä työssä esitettävien, simuloinneista saatujen tulosten kanssa. Kuvassa 18 on esitetty nykyisen rakennuskannan tilojen ja ilmanvaihdon tarvitsema lämmityksen tehoprofiili ja kuvassa 19 on esitetty käyttöveden lämmitystarpeen tehoprofiili vastaavasti.



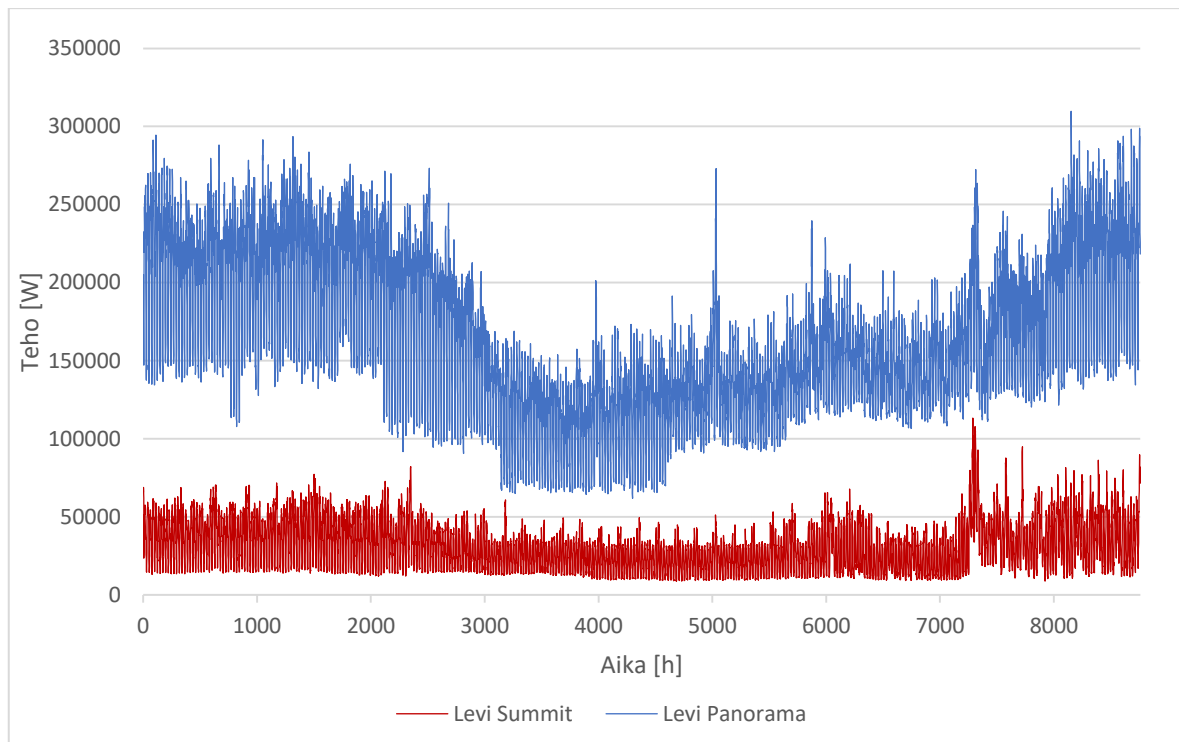
Kuva 18. Levi Panoraman ja Levi Summitin lämmityksen normitetut tehoprofiilit



Kuva 19. Levi Panoraman ja Levi Summitin käyttöveden lämmityksen tehoprofiilit.

Vuoden aikana Levi Panoraman ja Levi Summitin yhteenlasketut energiantarpeet ovat noin 2646 MWh tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksessä ja 274 MWh käyttöveden lämmityksessä. Huipputehon tarpeet ovat puolestaan noin 1030 kW tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksessä ja 119 kW käyttöveden lämmityksessä. Laskettuihin huipputehoihin on kuitenkin syytä suhtautua varauksella, etenkin käyttöveden osalta, jonka tehohuiput vaikuttavat liian pieniltä vastatakseen todellista tapausta. Tämä johtuu pääosin siitä, että käyttövedelle laskettu kuukausittainen energiantarve on jaettu koko laskenta-ajalle, vaikka todellisuudessa käyttöveden lämmitystarve on hetkittäistä. Olemassa olevan mittaustiedon perusteella on kuitenkin mahdotonta määrittää käyttöveden lämmityksen todellista tehoprofiilia ja kulutushuippujen ajoittumista. Vaikka tarkkaa tietoa ei olekaan käytettävissä, on käyttöveden lämmityksen osuus tässä tapauksessa päätetty silti erottaa tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksestä, jotta myöhemmin mainitulle voidaan tehdä normitus oikeaoppisesti. Kokonaisuudessaan olemassa olevan rakennuskannan vuotuinen lämmöntarve on noin 2920 MWh ja huipputeho noin 1140 kW.

Sähköenergian tarpeen arvioinnin perustana käytetään tässä tapauksessa suoraan vuoden 2017 mittaustietoa. Datalle ei siis tehdä minkäänlaista käsittelyä vaan vuoden 2017 oletetaan edustavan tyypillistä vuotta riittävän tarkasti. Käytetyn mittaustiedon perusteella Panoraman vuotuinen sähköenergian tarve on noin 1444 MWh ja huipputeho on noin 310 kW. Summitin vuotuinen sähköenergian tarve on puolestaan noin 275 MWh ja huipputeho noin 113 kW. Yhteensä rakennusten vuotuinen sähköntarve on noin 1719 MWh ja huipputeho noin 389 kW. Vuoden 2017 mittausdataan perustuvat sähköntarpeen tehoprofiilit on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Levi Panoraman ja Levi Summitin sähköntarpeet vuonna 2017.

## 7.2.2 Tulevan rakennuskannan energian tarpeet: 1. vaihe

Tulevan rakennuskannan energiankäytön profiilien osalta tarkastellaan kahta eri tapausta. Ensimmäiseen tapaukseen kuuluvat vaiheessa 1 rakennettavat rakennukset (Villat ja hybridienergiakeskus) sekä Levi Panorama ja Levi Summit. Toisessa tapauksessa tarkastellaan tilannetta, jossa kaikki alueelle suunnitellut rakennukset on rakennettu. Tämä tilanne sisältää siis vaiheen 1 rakennusten lisäksi alueelle suunnitellun kylpylähotellin. Näiden kahden tapauksen energiaprofiileja käytetään pohjana myöhemmin esitettävissä energiakeskukseen ja sen tuotantolaitosten analyysiin liittyvissä tarkasteluissa.

Ensimmäisessä vaiheessa rakennettavien rakennusten energiantarpeet lasketaan tässä työssä toteutetulla yksinkertaistetulla energialaskentamenetelmällä. Tärkeimmät lähtötiedot energialaskennalle on esitetty taulukoissa 5 – 7. Villat käsitellään energialaskennan osalta tässä tapauksessa pieninä asuinrakennuksina, jolloin ihmisistä, valaistuksesta ja laitteista syntyvät lämpökuormat sekä niiden käyttöaikataulut määritettiin Ympäristöministeriön (2017) energiatehokkuusasetuksen mukaan. Käyttöveden lämmityksen laskennassa noudatettiin niin ikään edellä mainittua energiatehokkuusasetusta, jonka mukaan pienten asuinrakennusten vuotuinen käyttöveden lämmöntarve on 35 kWh/m<sup>2</sup>. Rakennuksen geometriaan sekä rakenteisiin liittyvät lähtötiedot perustuvat kohteiden arkkitehtisuunnitelmiin, jotka on julkaistu päivämäärällä 21.12.2018 (Leppänen arkkitehdit Oy 2018). Rakennusten teknisten järjestelmien lähtöarvot puolestaan perustuvat kirjoitushetkellä voimassa oleviin määräyksiin sekä yleisiin käytäntöihin. Laskennassa käytettiin rakennusten energiasimulointiin tarkoitettua Sodankylän testivuodenvuoden 2012 (TRY2012 Sodankylä) säätietoja, joka on kehitetty Ilmatieteen laitoksen ja Aalto-yliopiston yhteistyönä (Jylhä et al. 2011). Sisälämpötilan asetusarvon minimiksi määritettiin 21 °C ja maksimiksi 25 °C.

*Taulukko 5. Ensimmäisen vaiheen rakennusten kerrospinta-alat ja rakennustilavuudet.*

Rakennus	Kerroslukumäärä [kpl]	Kerrospinta-ala [m <sup>2</sup> ]	Rakennustilavuus [m <sup>3</sup> ]
Villat – talo A	2	474	1800
Villat – talo B	2	945,5	3590
Villat – talo C	1	242,5	1020
Villat – talo D	1	483,5	2040
Villat – talo E	1	363	1530
Villat – talo F	1	242,5	1020
Energiakeskus	1	807	6217

*Taulukko 6. Ensimmäisen vaiheen rakennusten rakennusvaipan osien pinta-alat*

Rakennus	Yläpohja [m <sup>2</sup> ]	Alapohja [m <sup>2</sup> ]	Ulkoseinät [m <sup>2</sup> ]	Ikkunat ja ovet [m <sup>2</sup> ]
Villat – talo A	274,6	273,2	355,1	93,5
Villat – talo B	505,4	502,9	588,4	186,8
Villat – talo C	243,7	242,5	158,2	51,8
Villat – talo D	485,9	483,5	261,8	100,0
Villat – talo E	364,8	363,0	210,6	75,3
Villat – talo F	243,7	242,5	158,2	51,8
Energiakeskus	819,0	807,0	735,0	56,0

*Taulukko 7. Ensimmäisen vaiheen rakennusten rakennusvaipan osien U-arvot.*

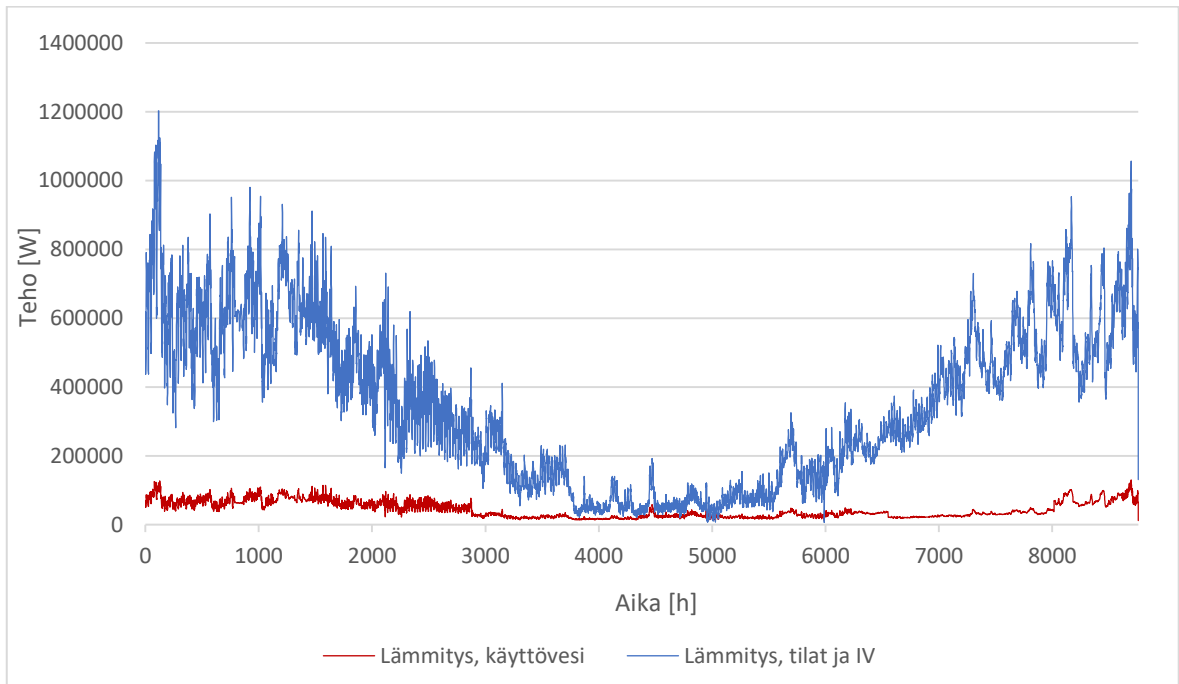
Rakennus	Yläpohja [W/(m <sup>2</sup> K)]	Alapohja [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ulkoseinät [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ikkunat ja ovet [W/(m <sup>2</sup> K)]
Villat	0,08	0,14	0,13	1,0
Energiakeskus	0,09	0,14	0,16	1,0

Taulukossa 8 on esitetty rakennusten energialaskennan ilmanvaihdon ja vuotoilman lähtötiedot. Tuloilmavirran osalta on tarkastettu, että se täyttää sekä FINVAC ry:n (2017) laatimassa oppaassa asetetut tilakohtaiset ilmamääräarvot sekä yleisesti käytetyn minimivaatimuksen 0,5 vaihtoa/h. Lisäksi oletetaan, että tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret. Ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhteena käytettiin tässä tapauksessa arvoa 70 % ja SFP-luvun arvoksi asetettiin 1,8 kW/(m<sup>3</sup>/s). Tuloilman lämpötila asetettiin arvoon 18 °C ja se pidettiin vakiona koko laskentajakson ajan. Ilmanvaihdon lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien kokonaishyötysuhteiksi oletettiin 95 %. Tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen järjestelmien vastaavaksi hyötysuhteeksi asetettiin 90 % ja käyttöveden lämmityksen hyötysuhteeksi 95 %.

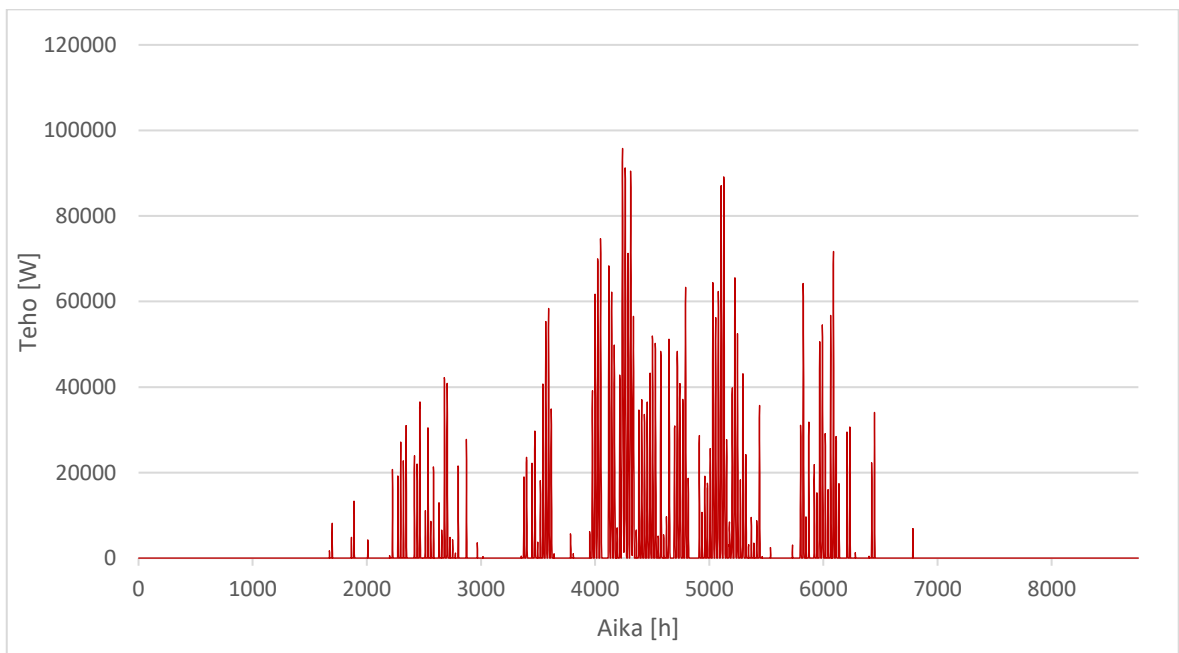
*Taulukko 8. Ensimmäisen vaiheen rakennusten ilmvirrat.*

Rakennus	Tuloilmavirta [m <sup>3</sup> /s]	Ilmanvuotoluku [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)]
Villat – talo A	0,250	2
Villat – talo B	0,500	2
Villat – talo C	0,124	2
Villat – talo D	0,282	2
Villat – talo E	0,213	2
Villat – talo F	0,124	2
Energiakeskus	0,864	2

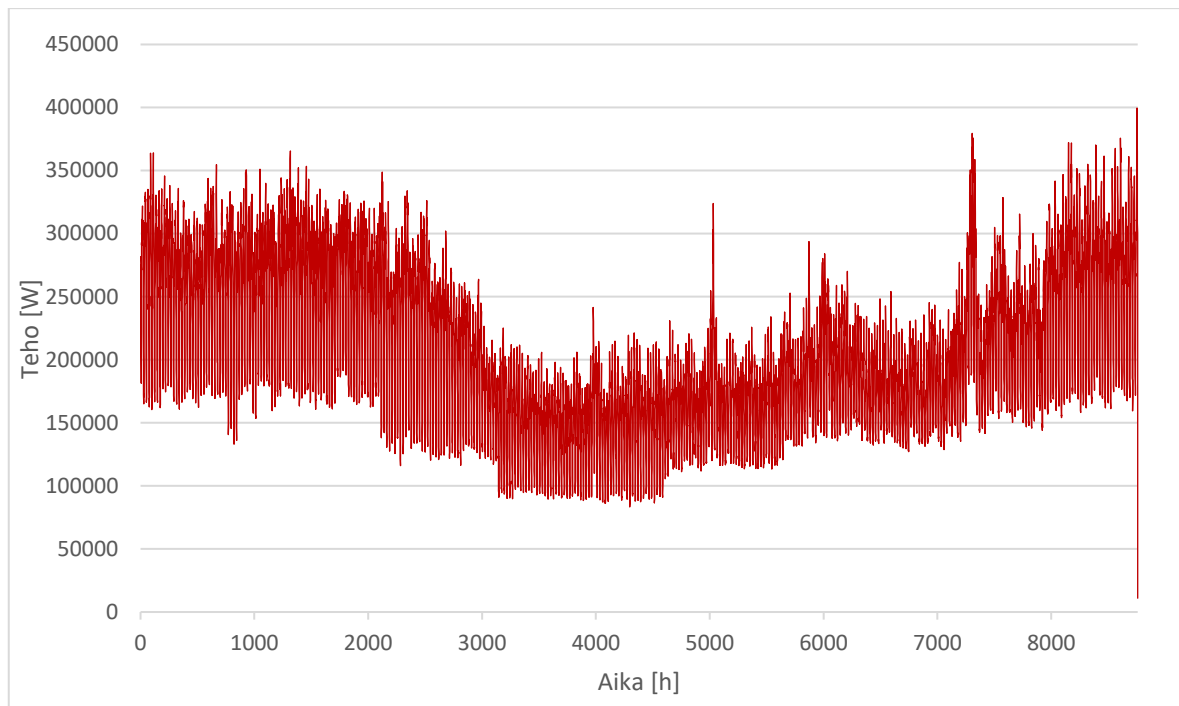
Energialaskennan tuloksena saadaan tuntiakohtaiset energiaprofiilit rakennusten tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitykselle, tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytykselle, sekä sähkön käytölle. Ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen Koutalaella olevien rakennusten yhteenlasketut tuntiakohtaiset energiaprofiilit on esitetty kuvissa 21 – 23. Ensimmäisen vaiheen rakentamisen jälkeen alueen yhteenlaskettu tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergian tarve on noin 3039 MWh ja käyttöveden lämmityksen energiantarve on noin 375 MWh. Vuotuinen lämmityksen kokonaistarve on luonnollisesti tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmöntarpeiden summa eli noin 3414 MWh. Vastaavasti alueen rakennuskannalle yhteen laskettu jäähdytystarve on noin 25 MWh. Sähköenergian vuotuinen tarve on puolestaan noin 1815 MWh.



Kuva 21. Lämmityksen tehoprofiilit ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.

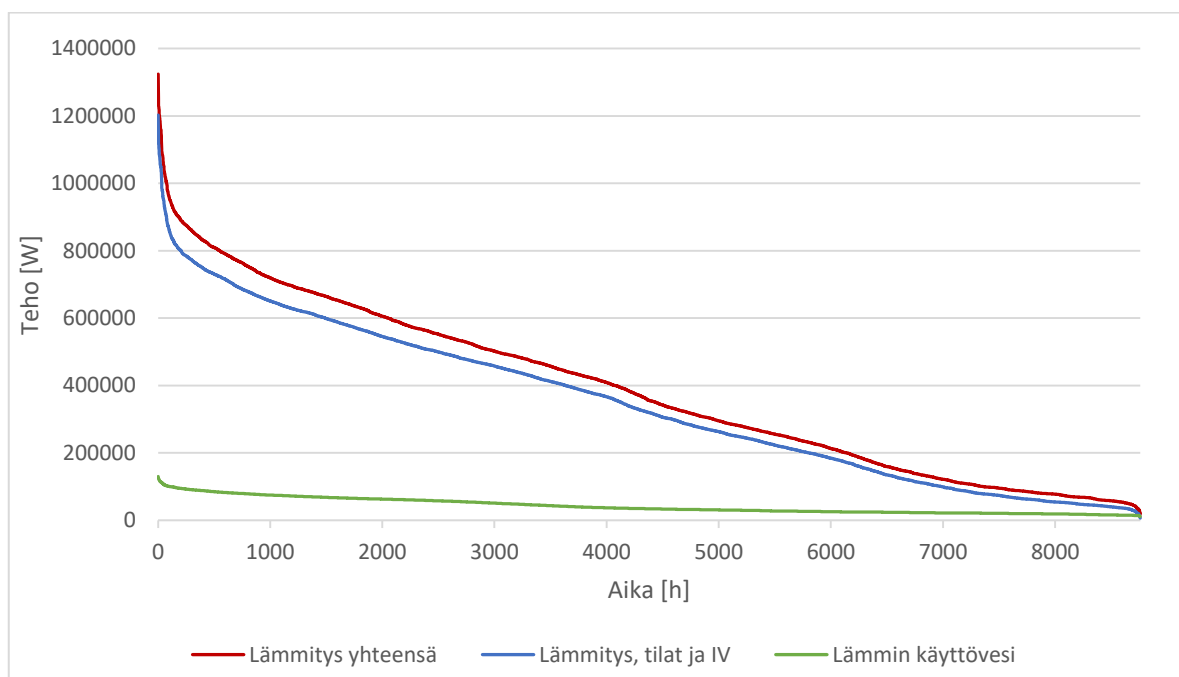


Kuva 22. Jäähdytyksen tehoprofiili ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.

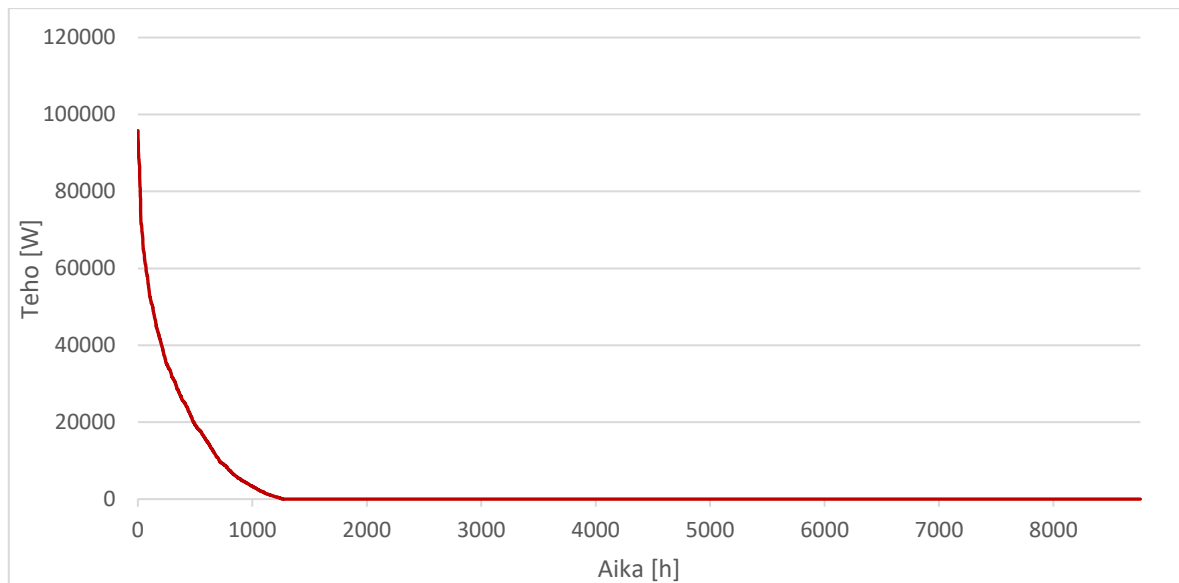


Kuva 23. Sähkön tarpeen tehoprofiili ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.

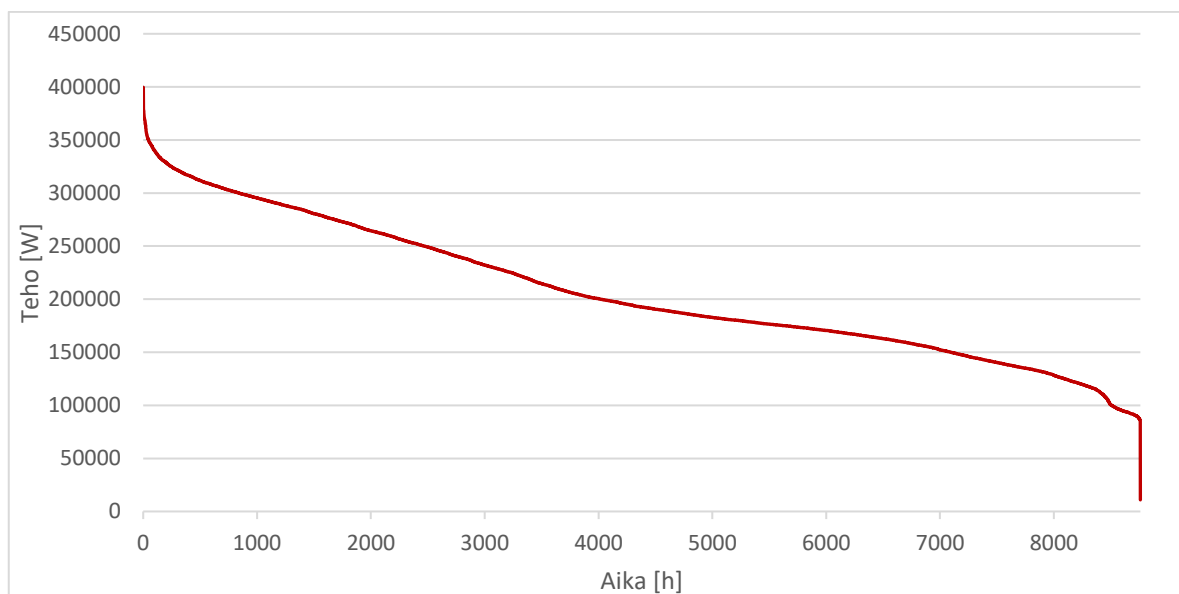
Tässä vaiheessa on myös hyödyllistä tarkastella energian tarpeiden pysyvyyskäyriä. Niiden avulla on helpompi tehdä huipputehon tarpeeseen ja myöhemmin myös energian tuotantolaitosten mitoituksiin liittyviä tarkasteluja. Pysyvyyskäyrät on esitetty kuvissa 24 – 26. Alueelle lasketut huipputehon tarpeet ovat noin 1324 kW lämmityksessä, noin 96 kW jäähdytyksessä ja 400 kW sähkön tarpeessa. Lämmityksen ja etenkin jäähdytyksen pysyvyyskäyristä nähdään, että huipputehoa tarvitaan vain lyhyenä aikana vuodessa. Sähkön tarve on puolestaan jakautunut tasaisemmin koko vuoden ajalle. Lämmitys- ja sähkötehoa tarvitaan vuoden ympäri, kun taas jäähdytystä tarvitaan ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen noin 1300 tuntia vuodessa.



Kuva 24. Lämmitystehon pysyvyyskäyrä ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.



Kuva 25. Jäähdytystehon pysyvyyskäyrä ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.



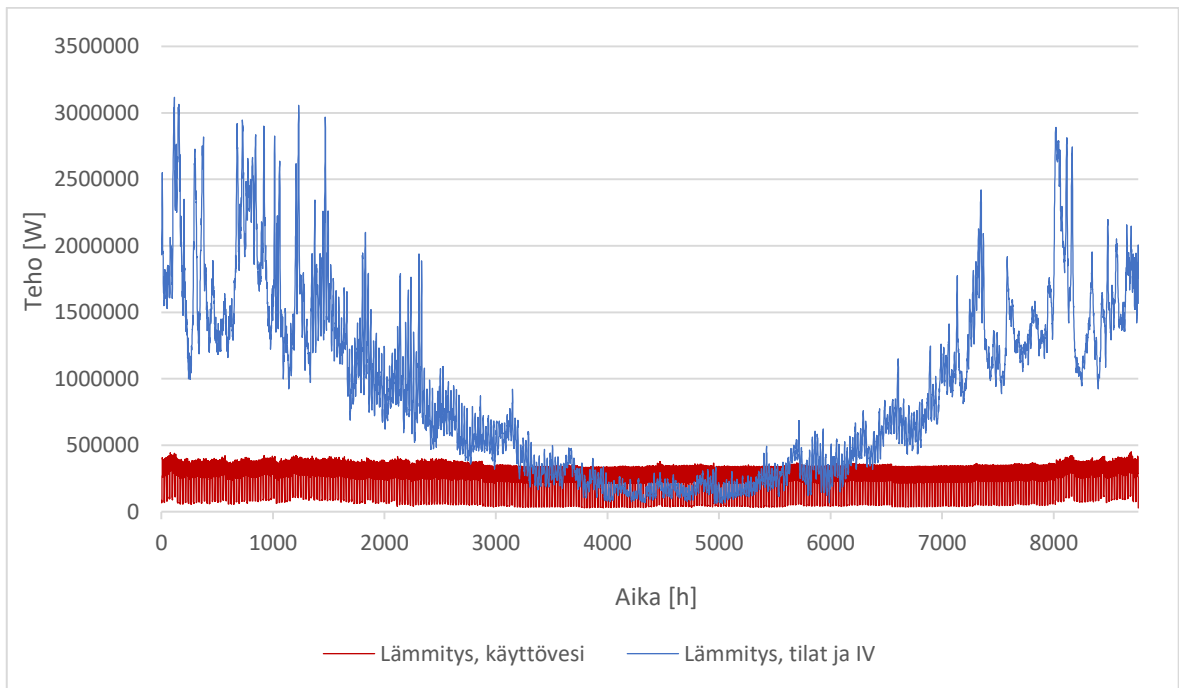
Kuva 26. Sähkötehon pysyvyyskäyrä ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeen.

### 7.2.3 Tulevan rakennuskannan lopulliset energian tarpeet

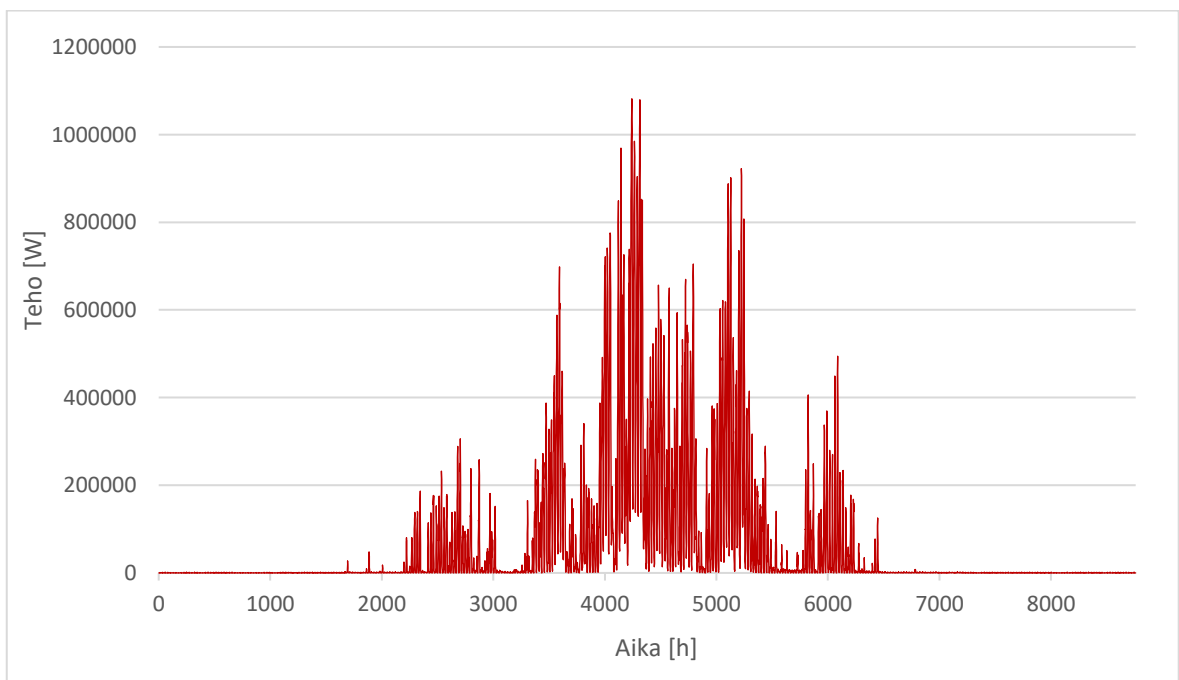
Tämän työn kirjoitushetkellä suunnitelmia Koutalaen lopullisesta tulevasta rakennuskannasta ei ole vielä lyöty täysin lukkoon ja muutokset suunnitelmiin ovat mahdollisia. Alueellisen energiajärjestelmän mitoituksen kannalta on kuitenkin tärkeää ottaa huomioon siihen kytkettyjen rakennusten lopullinen suunnitelma. Tämän työn analyyseissa käytetään luonnollisesti siis kirjoitushetkellä voimassa olevia viimeisimpiä suunnitelmia, jotka sisältävät ensimmäisen vaiheen rakennusten lisäksi kolmeen siipeen ja maanalaisiin tiloihin jaetun hotellirakennuksen. Yksi hotellin siivistä sisältää myös kylpylän. Sorvari (2015) suoritti diplomityössään lämmitys- ja jäähdytystarpeiden laskennan edellä mainitulle kylpylähotellille IDA-ICE energiasimulointiohjelmistolla. Tämän energiasimuloinnin tuloksia käytetään myös tässä työssä kuvaamaan ensimmäisen vaiheen jälkeisten rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian käyttöä. Koska kylpylähotellin energiasimuloinnissa oli laskettu vain lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeet, täytyy



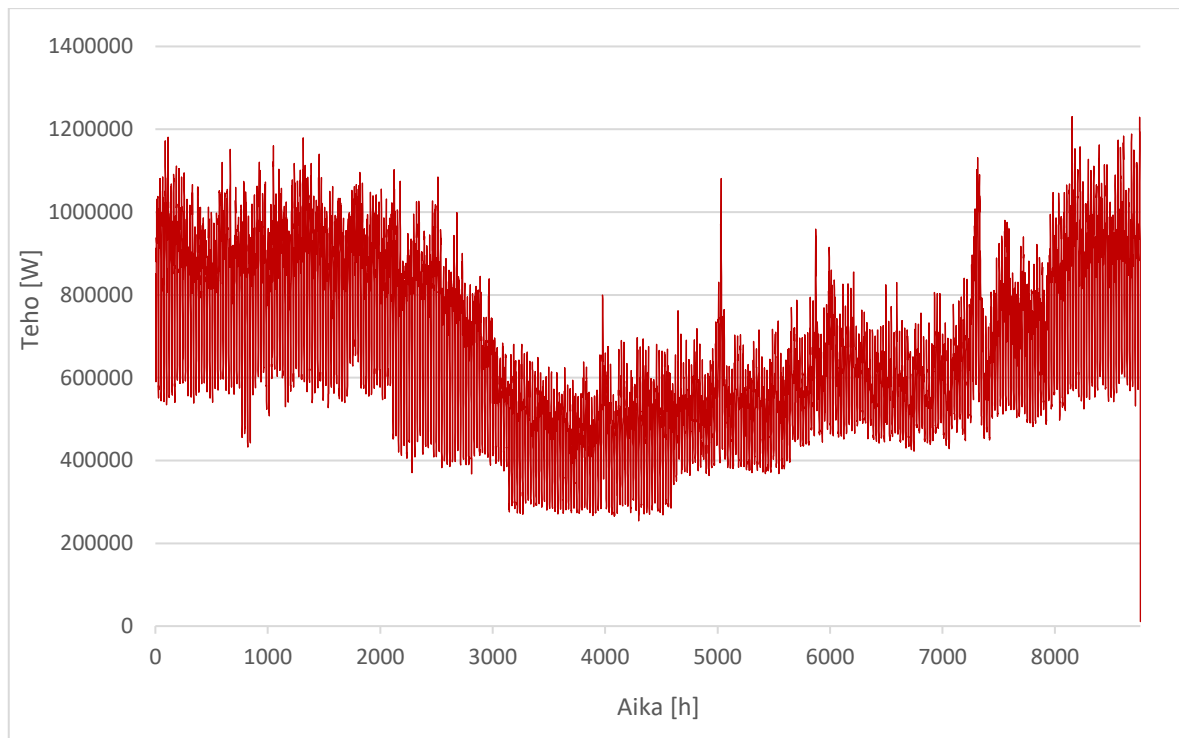
kylpylähotellin sähkön käyttö arvioida muulla tapaa. Tässä tutkimuksessa on oletettu, että kylpylähotellin sähkön tarve noudattaa samanlaista profiilia ja ominaistarvetta, kuin Levi Panorama hotelli. Panoraman, ja siten myös uuden kylpylähotellin sähkön ominaistarve on 93,16 kWh/m<sup>2</sup>. Koutalaen alueelle lasketut lopulliset energian tarpeiden tuntiprofiilit on esitetty nyt kuvissa 27 – 29. Vuotuiseksi tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeeksi saadaan 7918 MWh ja käyttöveden lämmityksen energian tarpeeksi 1913 MWh. Yhteensä lämmitysenergiaa tarvitaan siis 9831 MWh vuodessa. Jäähdytysenergian vuotuinen tarve on Koutalaen alueen valmistuttua puolestaan 534 MWh, kun taas sähköenergian vuotuinen tarve on 5821 MWh.



Kuva 27. Lämmityksen tehoprofiili lopullisessa tilanteessa.

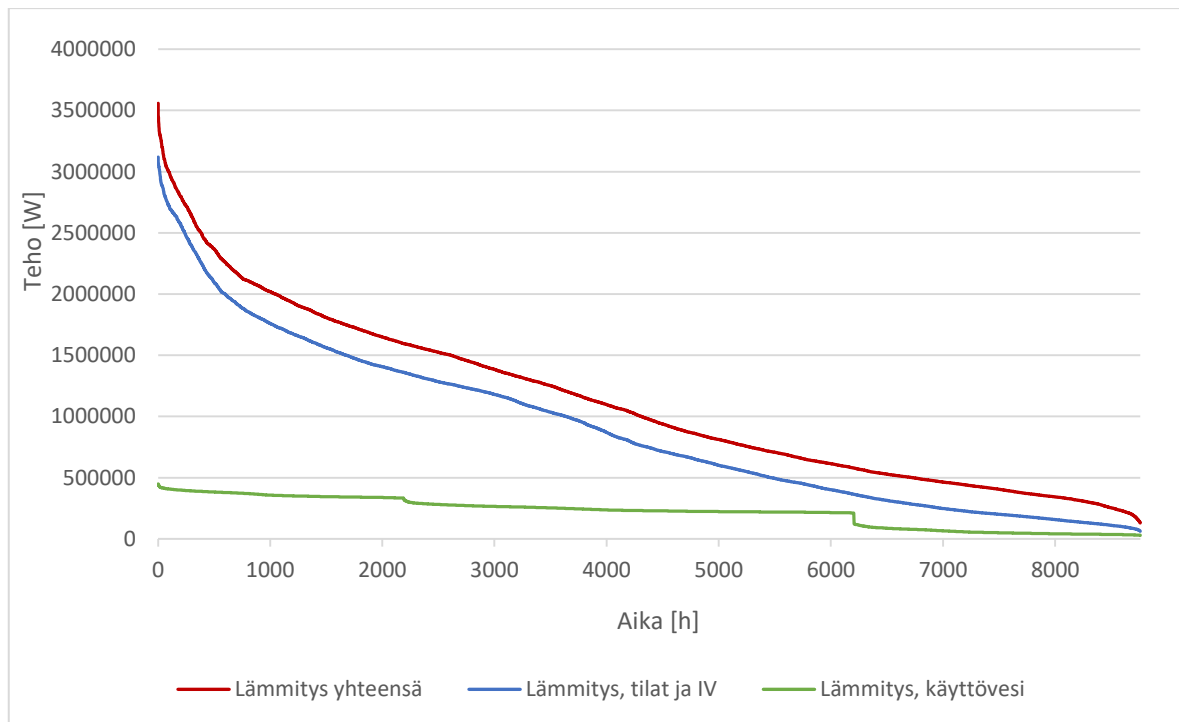


Kuva 28. Jäähdytyksen tehoprofiili lopullisessa tilanteessa.

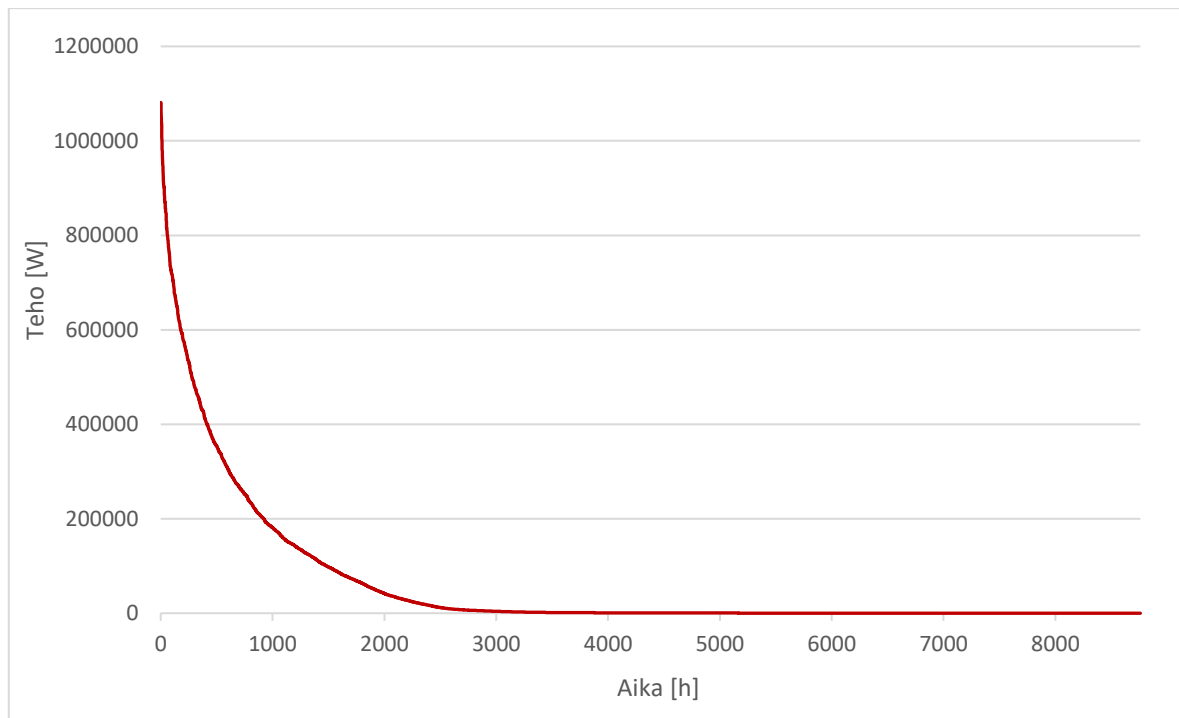


Kuva 29. Sähkön tarpeen tehoprofiili lopullisessa tilanteessa.

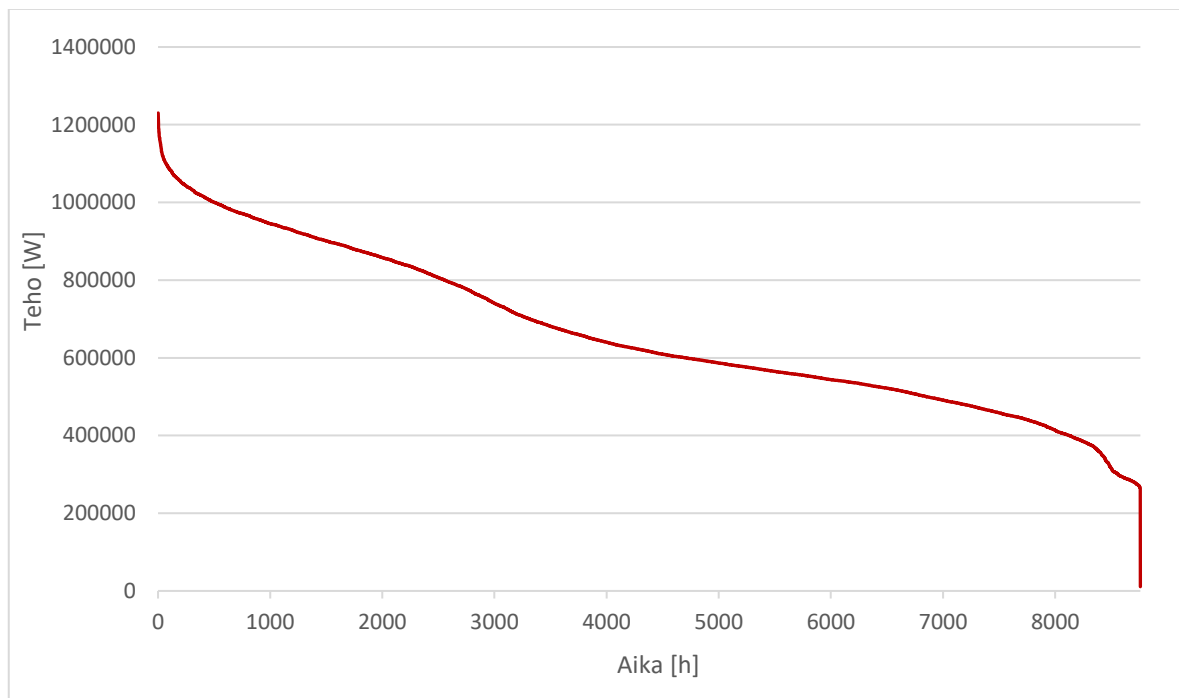
Lopullisessa tilanteessa alueelliseen energiaverkostoon liitettävien rakennusten vaatimat huipputehon tarpeet ovat tehdyn analyysin mukaan 3560 kW lämmityksessä, 1081 kW jäähdytyksessä ja 1230 kW sähkön käytössä. Tehon tarpeiden pysyvyyskäyrät on esitetty kuvissa 30 – 32. Jälleen voidaan todeta, että lämmityksen ja jäähdytyksen suurimpia tehoja tarvitaan vain hyvin lyhyenä aikana vuodessa. Luonnollisesti lämmitys- ja sähkötehoa tarvitaan jälleen ympäri vuoden. Jäähdytystehoa tarvitaan noin 3200 tuntia vuodessa.



Kuva 30. Lämmitystehon pysyvyyskäyrä lopullisessa tilanteessa.



*Kuva 31. Jäähdytystehon pysyvyyskäyrä lopullisessa tilanteessa.*

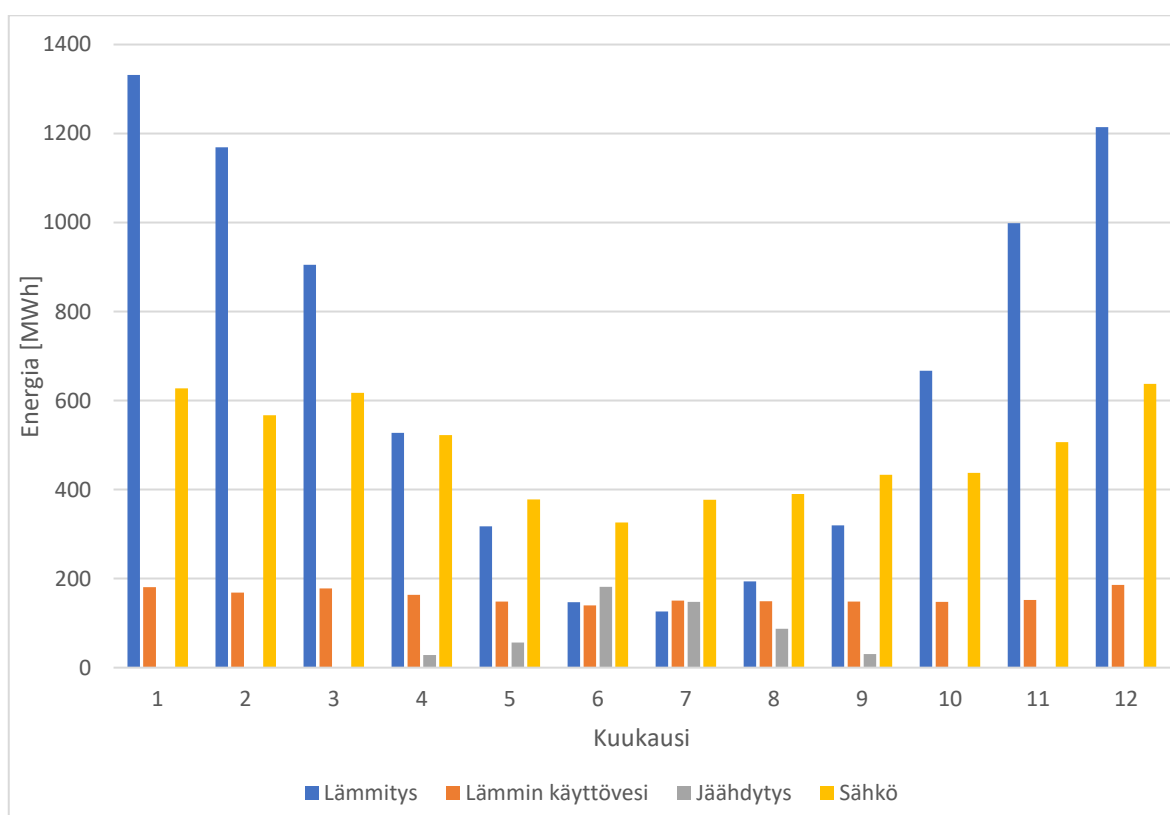


*Kuva 32. Sähkötehon pysyvyyskäyrä lopullisessa tilanteessa.*

Taulukossa 9 on esitetty vielä analyysissa saadut vuotuiset energian ominaistarpeet kullekin hybridienergiajärjestelmään liitettävälle rakennukselle. Tämän lisäksi kuvassa 33 on esitetty Koutalaen alueen energian tarpeiden jakautuminen kuukausitasolla. Energian tarpeista nähdään, että tilojen lämmityksen tarve on huomattavasti suurempaa, kuin käyttöveden lämmityksen, jäähdytyksen tai sähkön tarpeet. Huomion arvoista on myös, että laskelmien mukaan kesäkuukausina tarvitaan yhtäaikaaisesti sekä lämmitystä, että jäähdytystä.

Taulukko 9. Koutalaen rakennusten vuotuiset energian ominaistarpeet.

Rakennus	Pinta-ala [m <sup>2</sup> ]	Tilojen lämmitys [kWh/m <sup>2</sup> ]	Lämmin käyttövesi [kWh/m <sup>2</sup> ]	Jäähdytys [kWh/m <sup>2</sup> ]	Sähkö [kWh/m <sup>2</sup> ]
Levi Panorama	15500	132,8	16,9	0	93,2
Levi Summit	3500	168,1	3,6	0	78,5
Villat – talo A	474	82,6	36,8	12,4	29,3
Villat – talo B	945,5	74,1	36,8	10,2	29,3
Villat – talo C	242,5	102,7	36,8	7,2	31,2
Villat – talo D	483,5	92,9	36,8	5,8	29,5
Villat – talo E	363	96,4	36,8	6,4	30,3
Villat – talo F	242,5	102,7	36,8	7,2	31,2
Energiakeskus	807	190,3	0	1,6	16,9
Kylpylähotelli	43000	113,4	35,8	11,8	93,2



Kuva 33. Koutalaen alueen lopulliset energian tarpeet kuukausittain.

### 7.3 Koutalaen alueellinen hybridienergiaratkaisu

Energian tarpeiden laskeminen on vasta ensimmäinen askel alueellisen hybridienergiajärjestelmän teknistaloudellisen analyysin suorittamisessa. Tämän jälkeen täytyy vielä määrittää siirtoverkkojen tekniset ominaisuudet sekä alueellisessa energiantuotannossa käytettävät teknologiat, niiden tehokokoluokat ja käyttöjärjestys. Lopuksi tulee vielä tehdä taloudellinen analyysi ratkaisun kannattavuudesta kokonaisuutena sekä arvioida mahdollisia käytännön toteutukseen liittyviä haasteita tai mahdollisuuksia. Tässä luvussa esitetään Koutalaen hybridienergiajärjestelmään liittyvät analyysit, sekä niiden tulokset niin siirtojärjestelmän, paikallisen energian tuotannon, kuin taloudellisuudenkin osalta.

### 7.3.1 Analyysin lähtökohdat

Alueellisen hybridienergiajärjestelmän kokonaisvaltainen toteutettavuuden analysointi vaatii tietoja monista järjestelmän osien teknisistä ja taloudellisista ominaisuuksista. Myös tämän työn analyysit vaativat useiden erilaisten, muun muassa suorituskyykyyn liittyvien teknisten arvojen, sekä hintoihin ja niiden kehitykseen liittyvien taloudellisten lukujen määrittämisen. Kuten laskentaan ja simulointiin perustuvissa analyyseissä yleensä, tehdyillä oletuksilla ja käytetyillä lähtöarvoilla on olennainen vaikutus lopputulokseen. Jotta tehdyn analyysin tulokset olisivat myöhemmin helpommin tulkittavissa, esitetään seuraavaksi tärkeimmät ja tuloksiin merkittävimmin vaikuttavat lähtöarvot ja oletukset.

Kuten aiemmin jo todettiin, alueellisen energiajärjestelmän tuotantorakenne voidaan periaatteessa muodostaa äärettömän monella tavalla ja niinpä kyseessä onkin pohjimmiltaan optimointiongelma. Tässä työssä ei kuitenkaan ole suoritettu varsinaista optimointia Koutalaen järjestelmälle, vaan tuotantorakenteen osalta on tutkittu kuutta erilaista tapausta, joiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä tuotantoon liittyvistä kannattavista toimenpiteistä. Taulukossa 10 on esitetty kuhunkin tapaukseen sisältyvät energian tuotantolaitokset sekä niiden nimellistehot ja suunniteltu käyttöjärjestys. Tuotantolaitosten käyttöjärjestys on ilmaistu numeroinnilla laitoksen edellä. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on merkitty sekä lämmön, että sähkön tuotannon sarakkeisiin ja niiden osalta oletetaan, että tuotannon ohjaus seuraa lämmöntarpeen vaihteluita. Yhteistuotannon ja hakekattilalaitoksen on suunniteltu käyttävän polttoaineenaan metsähaketta. Öljykattilassa puolestaan poltetaan kevyttä polttoöljyä.

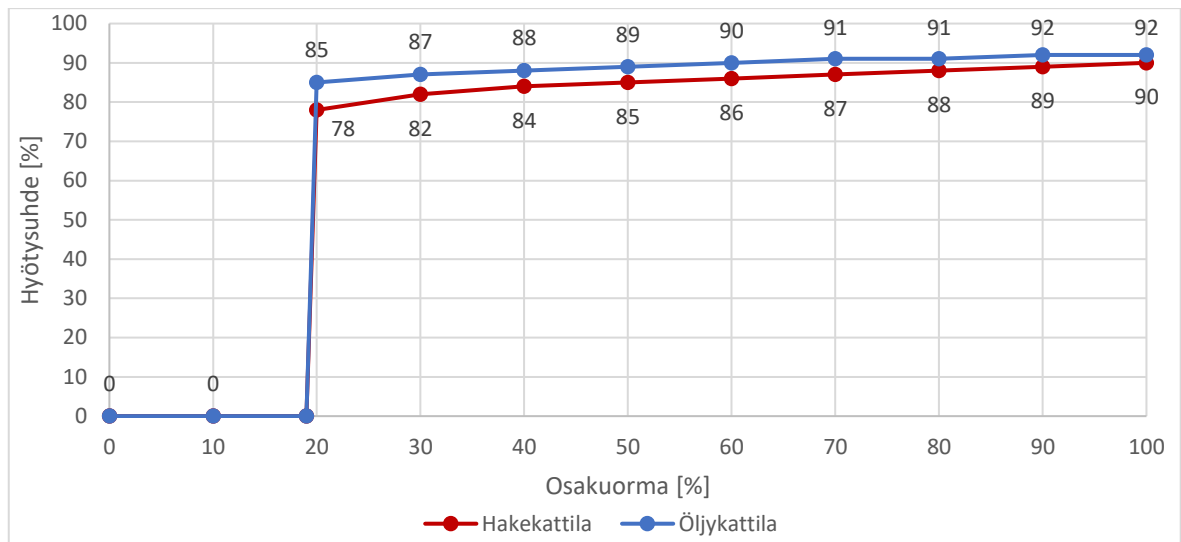
Järjestelmän tuotantolaitosten pääpiirteiden lisäksi tehdään muutamia linjauksia paikallisista energian siirtoverkoista ja energian tarpeista. Kaikissa analyyseissä on oletettu, että tarvittava jäähdytysenergia tuotetaan rakennuskohtaisesti sähköllä toimivilla jäähdytyslaitteilla kylmäkertoimella 3, jolloin erillistä jäähdytyksen siirtoverkkoa ei siis tarvita. Oletuksena on, että alueella on omat paikalliset lämmön ja sähkön siirtoverkot. Mainittakoon vielä, että kaikissa analyyseissä käytetään samoja rakennuskannan energian tarpeita, jotka ovat tässä työssä aiemmin esitetyt Koutalaen alueen lopulliset energian tarpeet.

Tutkituista tapauksista ensimmäinen kuvaa tilannetta, jossa kaikki tarvittava energia ostetaan ulkopuolisilta toimittajilta, eli kyseessä on rakentamisessa perinteinen tilanne. Ensimmäisessä tapauksessa ei siis ole kyse alueellisesta energiaratkaisusta, vaan tarkoituksena on verrata muita tapauksia siihen ja siten varmistaa hankkeen taloudellinen kannattavuus ylipäättään. Tapaus 2 puolestaan edustaa nykyistä suunnitelmaa Koutalaen hybridienergiaratkaisun tuotantorakenteesta. Loput tapaukset on pyritty valitsemaan siten, että mitoitusten mahdollisten muutosten vaikutukset olisivat analyysien tulosten perusteella pääteltävissä.

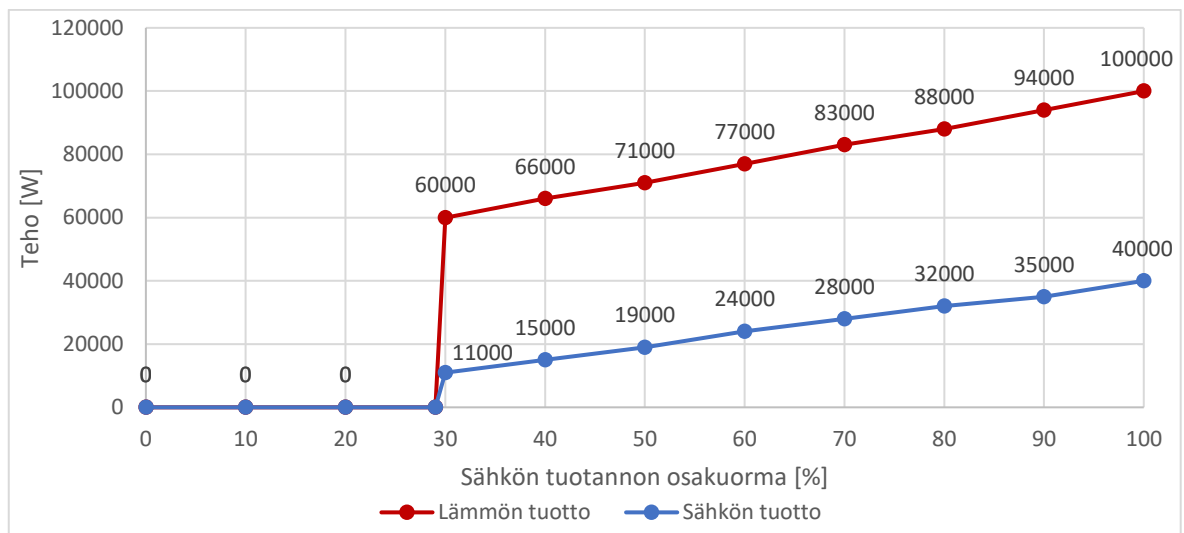
*Taulukko 10. Koutalaen energian tuotannon analyysitapaukset.*

	Lämmön tuotanto	Sähkön tuotanto
Tapaus 1	1. Kaukolämpö (ostoenergia)	1. Sähköverkko (ostoenergia)
Tapaus 2	1. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 2. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 3. Hakekattila 2000 kW 4. Maalämpöpumppu 500 kW 5. Öljykattila 1500 kW	1. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 2. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 3. Aurinkopaneelit 18 kW (100 m <sup>2</sup> ) 4. Sähköverkko (ostoenergia)
Tapaus 3	1. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 2. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 3. Hakekattila 2500 kW 4. Öljykattila 1500 kW	1. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 2. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 3. Sähköverkko (ostoenergia)
Tapaus 4	1. Aurinkokeräimet 100 m <sup>2</sup> 2. Maalämpöpumppu 2000 kW 3. Kaukolämpö (ostoenergia)	1. Sähköverkko (ostoenergia)
Tapaus 5	1. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 2. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 3. Hakekattila 1500 kW 4. Maalämpöpumppu 1000 kW 5. Öljykattila 1500 kW	1. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 2. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 3. Sähköverkko (ostoenergia)
Tapaus 6	1. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 2. Pien-CHP 100 kW <sub>th</sub> (hake) 3. Maalämpöpumppu 1000 kW 4. Hakekattila 1500 kW 5. Öljykattila 1500 kW	1. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 2. Pien-CHP 40 kW <sub>e</sub> (hake) 3. Sähköverkko (ostoenergia)

Energian tuotantolaitosten suorituskykyä kuvaavat arvot ovat tärkeässä roolissa, kun analysoidaan niiden keskinäistä paremmuutta. Hake- ja öljykattilat mallinnettiin tässä työssä yksinkertaisesti hyötysuhdekäyrän avulla. Analyyseissä käytetyt hyötysuhdekäyrät on esitetty kuvassa 34. Hakekattilan osalta lukuarvot perustuvat valmistajan ilmoittamiin hyötysuhteisiin erilaisilla osakuormilla. Öljykattilan on oletettu toimivan hieman paremmalla hyötysuhteella hakekattilaan verrattuna. Molempien lämpökattiloiden käytön minimitehoiksi asetetaan 20 % niiden mitoitustehoista. Lisäksi lämpökattiloiden analyyseissa oletetaan, että niiden yhteydessä on lyhytaikaiseen energian varastointiin tarkoitettut vesisäiliöt, joiden vaikutus arvioidaan nyt analyysityökaluun toteutetun puskurivaraajan laskentamallin avulla. Yhteistuotannon osalta oletetaan lämmöntuotannon hyötysuhteeksi vakio 51,34 % valmistajalta saatujen tietojen perusteella. Kuvassa 35 on esitetty CHP-laitosten tuotantokäyrä, joka kuvaa sähkön ja lämmön tuotannon tehon sähkön tuotannon osakuorman funktiona.

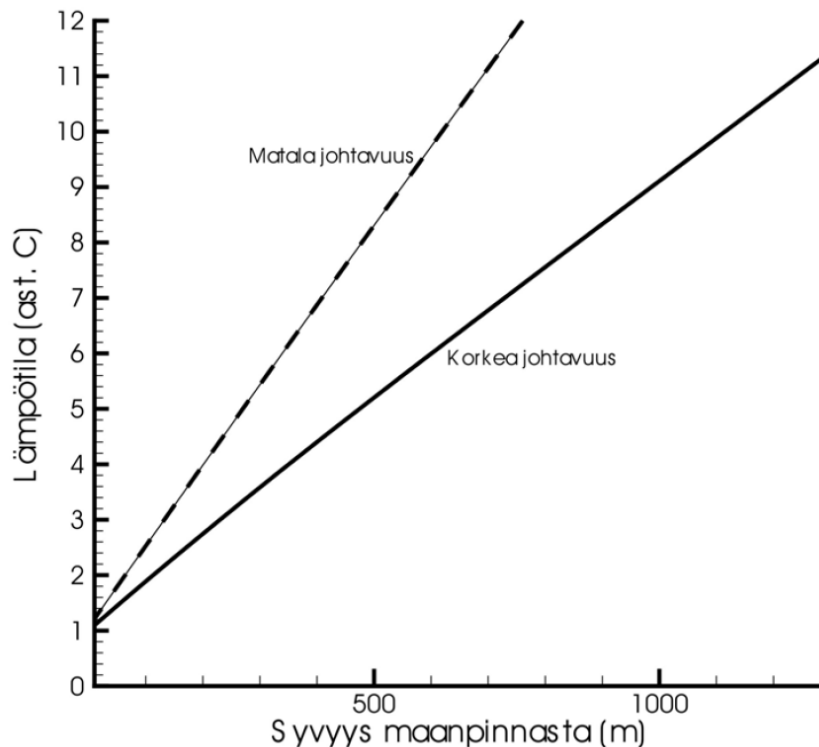


Kuva 34. Lämpökattiloiden hyötysuhteet osakuorman funktiona.



Kuva 35. Pienen mittakaavan CHP-laitosten tuotantokäyrä.

Maalämmön tuotannon osalta puolestaan oletettiin, että lämpöpumpun häviökerroin lämmitystilanteessa on noin 0,56. Tämä arvio perustuu todellisten tuotteiden suorituskäytännöihin, sekä lähteessä Luoranen (2017) esitettyihin arvoihin. Maalämpökentästä saatavan lämmönsiirtonesteen lämpötilaksi oletetaan tässä tapauksessa vakio 0 °C. Todellisuudessa maalämpökentästä saatavan nesteen lämpötila ei ole vakio, vaan se muuttuu ajan funktiona ja riippuu kentän mitoituksista sekä siitä otettavan energian määrästä. Lämmönsiirtonesteen lämpötilataso myös tyypillisesti laskee ajan kuluessa, kunnes saavutetaan maalämpökentän tasapainotila. Tämä voi kestää useita kymmeniä vuosia. Tässä työssä ei kuitenkaan pystytty tekemään maalämpökentän mallinnusta ajallisista rajoituksista johtuen, minkä takia analyyseissa käytetään vakio lämpötilaa. Oletuksena on, että maalämpökenttä pystytään mitoittamaan riittävän kokoiseksi, että sopiviin lämpötilatasoihin päästään. Itse lämpötilan lukuarvo perustuu Kukkosen ja Valjuksen (2006) tekemään selvitykseen, jossa Levin Koutalaen kalliolämpötilat on laskettu lämmönsiirtomallin avulla. Lämpökaivojen syvyydeksi on oletettu 200-300 metriä lämmönsiirtonesteen lämpötilaa määrittäessä. Kuvassa 36 on esitetty Koutalaen alueelle arvioidut kalliolämpötilat syvyyden funktiona kahdella eri maaperän lämmönjohtavuuden arvolla.

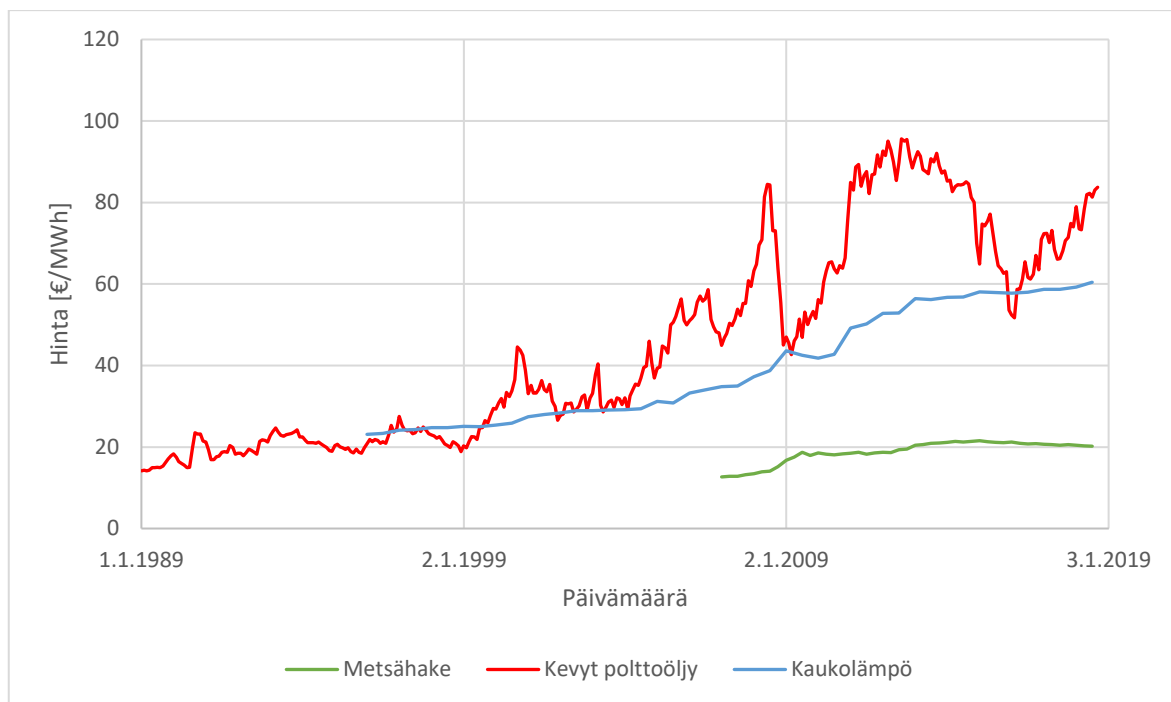


Kuva 36. Kalliolämpötilat Koutalaen alueella (Kukkonen & Valjus 2006).

Osa tarkasteluista sisältää myös aurinkoenergiaa hyödyntäviä teknologioita. Aurinkosähkön tuotantolaitosten osalta oletetaan, että 100 m<sup>2</sup> pinta-ala PV-paneeleja on nimellisteholtaan 18 kW ja että niissä käytetään piikideteknologiaa (c-Si). Aurinkokeräinten tekniset arvot määritetään seuraavasti: lämpöhäviötön hyötysuhde  $\eta_0 = 0,853$ , ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin  $a_1 = 2,71 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  ja toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin  $a_2 = 0,0046 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$ . Lisäksi aurinkolämmön yhteydessä oletetaan käytettävän puskurivaraajaa. Sekä aurinkokennojen, että –keräimien tekniset lähtöarvot perustuvat todellisten tuotteiden suorituskykyarvoihin. Aurinkokennojen ja –keräimien suuntaus oli analyyseissä etelään 55 asteen kallistuskulmalla. Säteilytiedot puolestaan saatiin Sodankylän testivuoden 2012 säätiedoista.

Teknisten suorituskykyarvojen ja hyötysuhteiden ohella tuloksiin vaikuttavat merkittävimmin analyyseihin liittyvät taloudelliset lähtöarvot. Näitä ovat esimerkiksi energian ja polttoaineiden hinnat ja niiden arvioitu kehitys, sekä laitteistojen vaatimat investoinnit. Energian ja polttoaineiden hinnat on määritelty tässä tapauksessa lähteestä Tilastokeskus (2019) saatujen tietojen perusteella. Tähän poikkeuksena on kaukolämpö, jonka hinta perustuu Koutalaen alueella toimivan kaukolämpöyhtiön hinnastossa ilmoitettuun lukuarvoon (Adven Oy 2019). Energian hintojen kehitys on puolestaan arvioitu Tilastokeskuksen (2019) raportoiman historiallisen tiedon perusteella siten, että hintakehityksen oletetaan jatkuvan samanlaisena, kuin mitä se on tähän mennessä ollut. Kuvassa 37 on esitetty lämmöntuotannon energian ja polttoaineiden hintojen toteutunut kehitys Suomessa. Taulukossa 11 puolestaan esitetään analyyseissä käytetyt parametrit energian ja polttoaineiden hinnoille. Sähkön hinnan osalta analyyseissä käytettiin vuoden 2017 Spot-hintaa, johon on lisätty myyjän marginaali, sähkövero ja sähkön siirron hinta. Muille energian lähteille käytettiin vakiohintaa. Kaikki energian hinnat määritettiin ilman arvonlisäveroa.





Kuva 37. Energian hinnat lämmön tuotannossa (Tilastokeskus 2019).

Taulukko 11. Analyysissa käytetyt energian hinnan parametrit.

Energia / polttoaine	Metsähake	Kevyt polttoöljy	Kaukolämpö	Sähkö
Hinta [€/MWh]	20,20	83,00	67,58	Elspot 2017
Eskalaatio [%]	2,7	5,8	4,5	2,0

Energian tuotantolaitoksiin liittyvät investoinnit sekä vuotuiset kiinteät kustannukset on puolestaan esitetty taulukossa 12. Hakekattilalaitoksen arvioitu investointikustannus perustuu tässä tapauksessa valmistajalta saatuun arvioon ja sisältää itse kattilalaitoksen lisäksi hakevaraston, savupiipun ja lyhytaikaiseen lämmön varastointiin tarkoitetut vesivaraajat. Öljykattilan ja pienen mittakaavan CHP-laitosten investointikustannukset puolestaan perustuvat Pihlaisen (2018) esittämiin laitekustannusten lukuarvoihin. Lämpökattiloiden vuotuisiksi kiinteiksi kustannuksiksi arvioidaan 5 % alkuinvestoinnista (Satakunnan ammattikorkeakoulu 2002). Samaa arviota käytetään nyt myös CHP-yksiköille. Aurinkoenergian kustannustiedot puolestaan perustuvat Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun ylläpitämän FinSolar-verkkosivuston tietoihin (Auvinen 2016, Auvinen & Jalas 2017). Kaukolämmön vuotuiset kiinteät kustannukset koostuvat sopimusvesivirran mukaan määritettävistä perusmaksuista. Tässä tutkimuksessa tulevat kaukolämmön perusmaksut on arvioitu Koutalaella olemassa olevien hotellien toteutuneiden perusmaksujen ja kaukolämpötoimittajan hinnaston (Adven Oy 2019) perusteella. Tapausta 1 varten vuotuiseksi perusmaksujen summaksi on arvioitu 135 k€. Liittymismaksuja ei ole otettu huomioon kaukolämmön tai sähkön osalta.

*Taulukko 12. Tuotantolaitosten investointi- ja ylläpitokustannukset.*

Tuotanto-laitos	Hakekattila	Öljykattila	Pien-CHP	Maalämpö	Aurinko-lämpö	Aurinko-sähkö
Investointi-kustannus	755 €/kW	60 €/kW	6700 €/kW <sub>e</sub>	Yhtälö 61	400 €/m <sup>2</sup>	1050 €/kW
Vuotuinen kiinteä kustannus	5 % alkuinves-toinnista	5 % alkuinves-toinnista	5 % alkuinves-toinnista	2% laiteinves-toinnista	1,5 €/m <sup>2</sup>	1,5 €/m <sup>2</sup>

Kuten aiemmin jo todettiin, maalämpökentän mitoitus riippuu siitä otettavan energian määrästä. Mitä enemmän energiaa maasta otetaan vuodessa, sitä suurempi kenttä tarvitaan. Näin ollen maalämpöjärjestelmän investointikustannus riippuu sekä lämpöpumpun tehokokoluokasta, että maalämpökentästä otettavan energian määrästä. Lämpöpumpun investointikustannuksen on arvioitu olevan 325 €/kW (Raiko & Mäki-Mantila 2005) ja maalämpökentän investointikustannus on 400 €/MWh vuotuisesta maakuormasta laskettuna asiantuntija-arvioon perustuen. Maalämpöinvestoinnin suuruus määritetään nyt siis yhtälön 61 mukaan. Maalämpöjärjestelmän vuotuinen ylläpitokustannus perustuu niin ikään lähteessä Raiko & Mäki-Mantila (2005) esitettyyn arvioon.

$$I_{ml} = \dot{Q}_{lp} \cdot 325 \frac{\text{€}}{\text{kW}} + Q_{ml} \cdot 400 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (61)$$

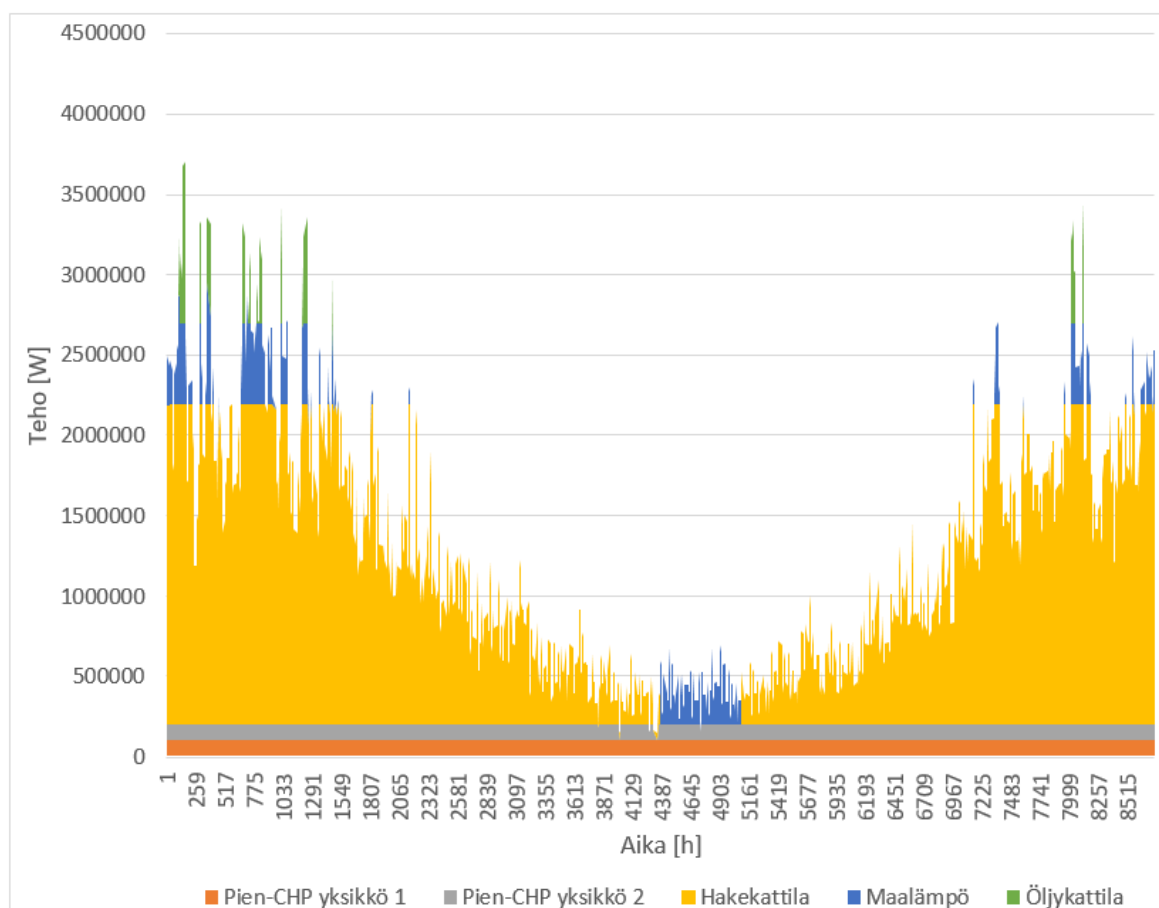
jossa  $\dot{Q}_{lp}$  on lämpöpumpun mitoitus-teho [kW]  
 $Q_{ml}$  on vuotuinen maalämpökentästä otettu energian määrä [MWh]

Aluelämpöverkon menoveden lämpötilaksi on tässä tutkimuksessa valittu vakio 70 °C, jolloin se riittää lämpimän käyttöveden tuottamiseen ilman lämpötilan nostamista kuluttajan laitteilla. Aluelämpöverkon lämpöhäviöksi on puolestaan arvioitu 10 % siihen syötetystä energiasta. Sähköverkko käsitellään tässä tapauksessa laskennallisesti kuten alueellinen siirtoverkko, mutta sen käytännön toteutukseen ei muuten oteta kantaa. Toisin sanoen tämä tarkoittaa sitä, että kaikki sähköenergia kulkee alueellisen siirtoverkon energiataseen kautta huolimatta siitä, miten asia käytännössä toteutettaisiin. Alueellinen sähköverkko oletetaan häviöttömäksi. Alueellisten siirtoverkkojen ja itse energiakeskuksen rakentamiseen liittyvien investointikustannusten sekä niiden käyttämiseen liittyvien kiinteiden kustannusten arvioiminen on hankalaa ilman tarkempia suunnitelmia ja laskelmia. Tämän työn puitteissa näitä ei ole aikataulusyistä tehty, joten siirtoverkkojen ja energiakeskuksen yhteiskustannukseksi arvioidaan nyt 500 k€ ja vuotuisiksi kiinteiksi kustannuksiksi 2 % investoinnista eli 10 k€. Näitä arvioita on kuitenkin syytä tarkentaa suunnittelun edetessä.

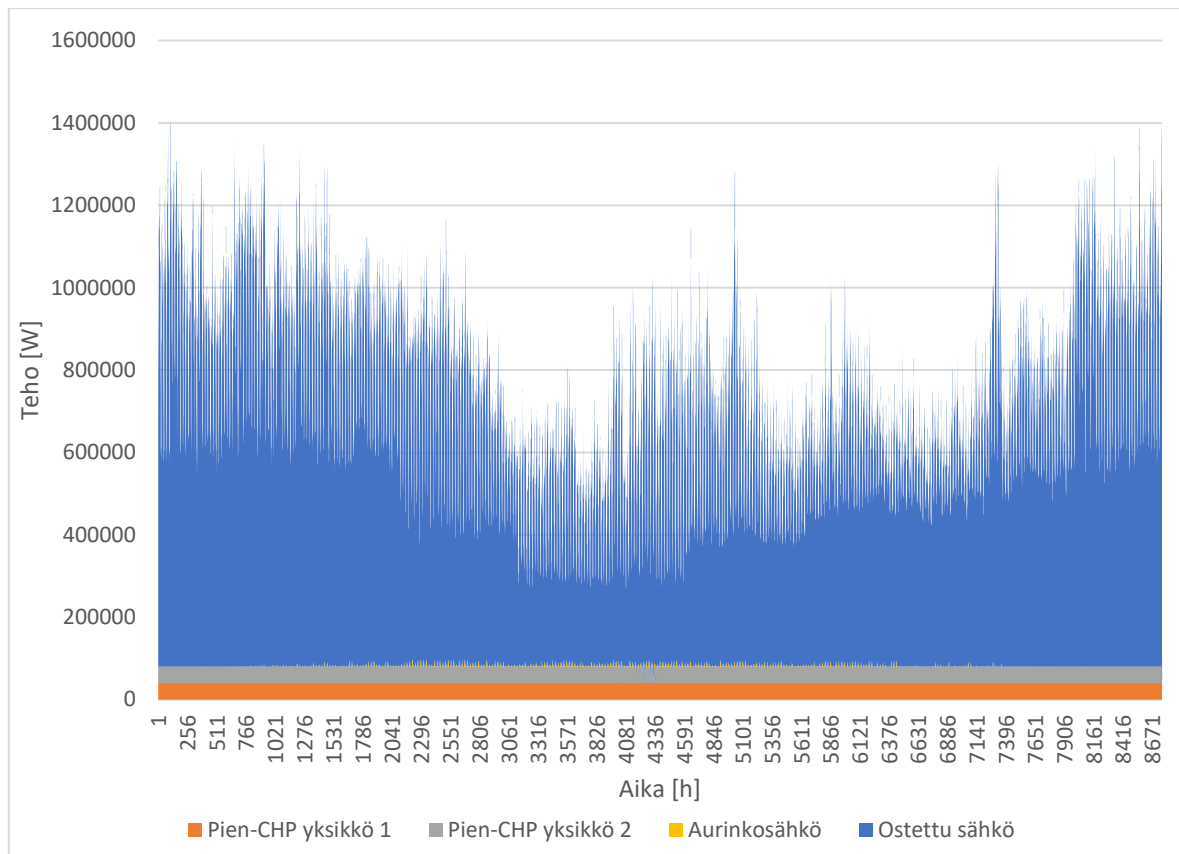
Lopuksi täytyy vielä määritellä elinkaarikustannuslaskennan yleiset parametrit, eli nimelliskorko, inflaatio ja tarkasteluajan pituus. Nimelliskorko ja tarkasteluajan pituus ovat jossain määrin laskijan valittavissa, kun taas inflaatio määritetään yleisen kuluttajahintaindeksi vuosimuutoksen perusteella. Tässä tutkimuksessa tarkasteluajan pituudeksi on valittu 20 vuotta ja nimelliskoroksi 6 %. Inflaatio on nyt määritetty Suomessa vuodesta 2002 lähtien toteutuneen inflaation keskiarvona, joka on 1,4 % (Suomen virallinen tilasto 2019). Vuonna 2002 euro otettiin käyttöön Suomen käteisvaluuttana ja on siksi valittu inflaation määrittämisen alkuhetkeksi.

### 7.3.2 Energiajärjestelmän nykyinen suunnitelma

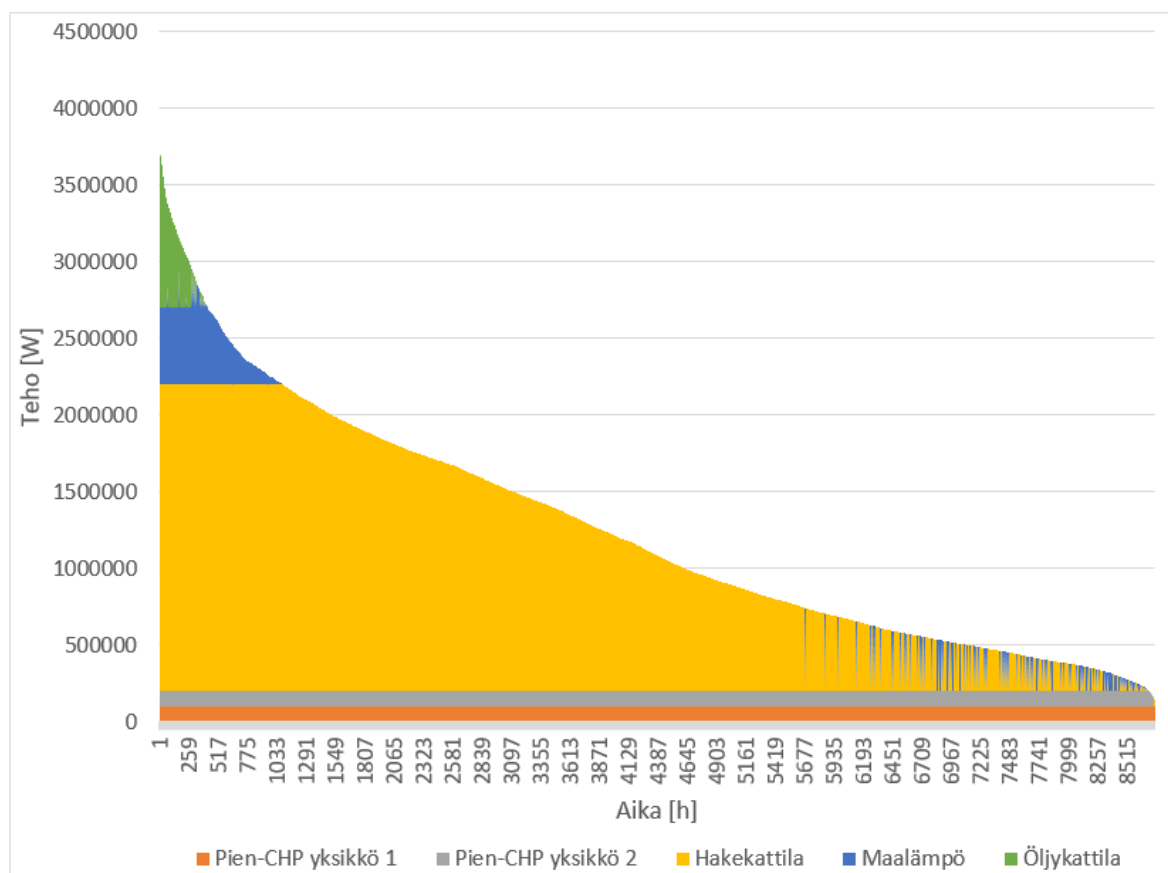
Taulukossa 10 esitetty tapaus 2 kuvaa työn kirjoitushetkellä viimeisintä Koutalaen hybridienergiajärjestelmän suunnitelmaa. Tämän tapauksen tarkemmat analyysitulokset esitetään tässä luvussa. Kuvassa 38 on esitetty lämmön tuotannon tehoprofiili ja kuvassa 39 vastaava profiili sähkön tuotannolle. Pysyvyyskäyrät lämmön ja sähkön tuotannolle on puolestaan esitetty kuvissa 40 ja 41. Pysyvyyskäyrät on tässä tapauksessa järjestetty suurimmasta tehosta pienimpään kokonaistuotannon perusteella. Lämmön omatuotannon huipputeho on 3955 kW ja omalla tuotannolla katetaan lämmön tarve kokonaisuudessaan. Lämmön tuotantoprofiilissa on myös nähtävissä hakekattilan käyttöajassa oletettu heinäkuun mittainen huoltotauko. Pihlaisen (2018) tekemän selvityksen mukaan pienen mittakaavan CHP-yksiköt vaativat tuotannon keskeytyksen ja huoltotauon aina 600 tunnin välein. Selvityksen mukaan valmistajan antama käyttöaikatakuu CHP-yksiköille on 7800 h/a. Tässä tutkimuksessa pienen mittakaavan CHP-yksiköiden huoltoajoja ei ole otettu huomioon, mikä vääristää tuloksia hieman. Sähkön omatuotannon huipputeho on puolestaan 98 kW. Sähkön huipputeho ostettu sähkö mukaan lukien on 1407 kW, joka on luvussa 7.2.3 esitettyä huipputehoa korkeampi. Tämä johtuu siitä, että nyt sähkön tarpeeseen on lisätty myös maalämpöpumpun, hakekattilan ja öljykattilan sähkön tarpeet.



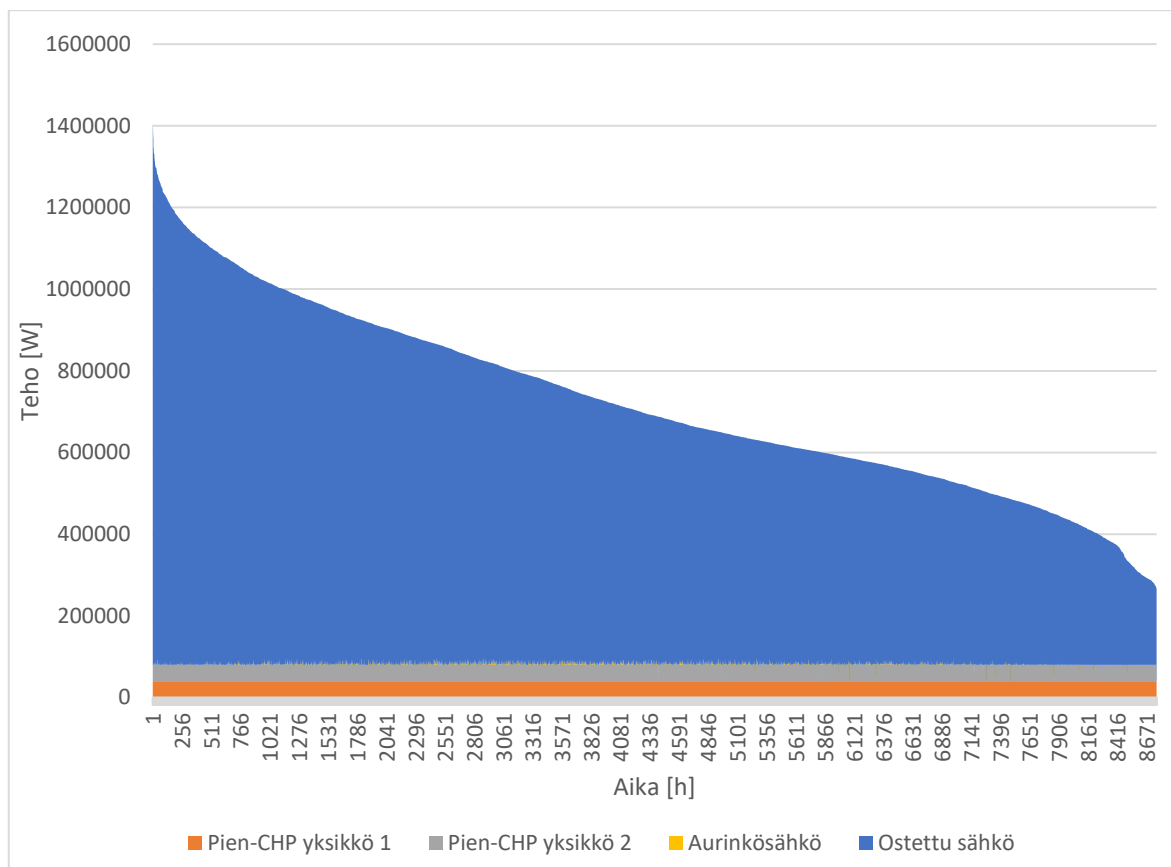
Kuva 38. Lämmön tuotannon tehoprofiili.



Kuva 39. Sähkön tuotannon tehoprofiili.



Kuva 40. Lämmön tuotannon pysyvyyskäyrä.

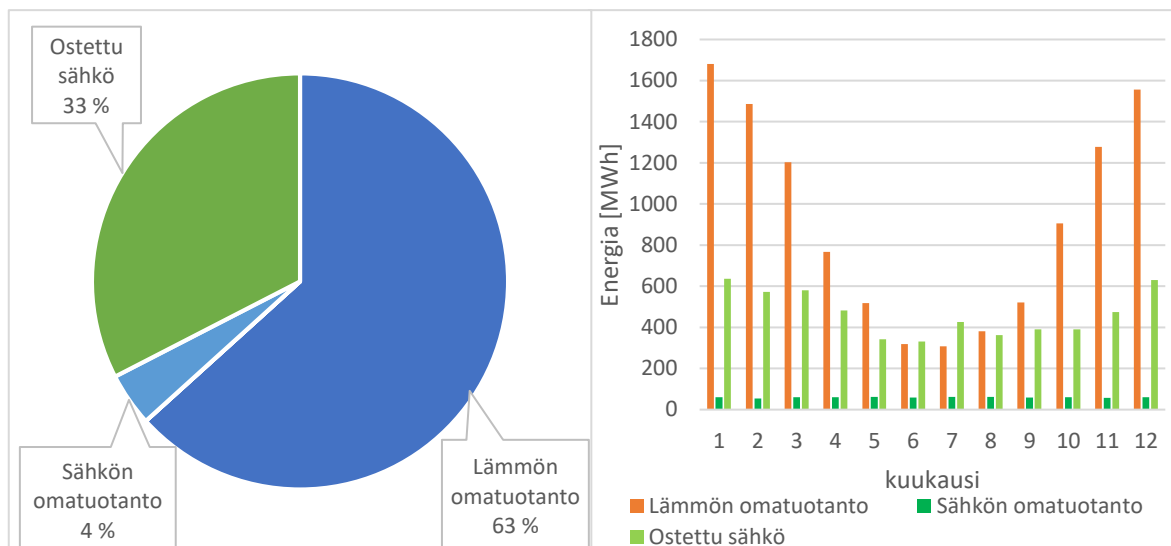


Kuva 41. Sähkön tuotannon pysyvyyskäyrä.

Taulukossa 13 on esitetty vuotuiset energian tuotannon ja ostoenergian määrät. Luvuista nähdään, että sähkön tuotanto on varsin vähäistä kokonaistarpeeseen verrattuna, vain noin 11 % siitä. Aurinkokennojen sähköntuotanto 100 m<sup>2</sup> pinta-alalla on kokonaisuuden kannalta käytännössä merkityksetön kattaen vain noin 0,24 % kokonaistarpeesta. Lämmön perustuotannoksi mitoitettu hakekattila kattaa luonnollisesti suurimman osan lämpöenergian tarpeesta, noin 78 %. Pienen mittakaavan CHP-yksiköillä puolestaan tuotetaan noin 16 % lämmöstä. Lämmön huipputuotanto katetaan ensin maalämmöllä ja sitten öljykattilalla. Kuvassa 42 on esitetty vielä alueellisiin siirtoverkkoihin syötetyn energian osuudet sekä vuosi-, että kuukausitasolla. Vuotuiset polttoaineen kulutukset ovat tällä hybridienergiaratkaisulla noin 12909 MWh/a metsähaketta ja 218 MWh/a kevyttä polttoöljyä.

Taulukko 13. Energian tuotannon ja ostoenergian vuotuiset määrät.

Tuotantolaitos	Lämmitysenergia [MWh/a]	Sähköenergia [MWh/a]
Pien-CHP yksikkö 1	876	350
Pien-CHP yksikkö 2	874	349
Hakekattila	8494	-
Maalämpö	514	-
Öljykattila	165	-
Aurinkokennot	-	15
Ostoenergia ulkopuolisilta toimittajilta	0	5616



Kuva 42. Alueellisiin siirtoverkkoihin syötetyn energian osuudet vuositasolla (vasemmalla) ja kuukausitasolla (oikealla).

Tuotantolaitoksille lasketut elinkaarikustannukset esitetään taulukossa 14, jossa ne on jaoteltu investointikustannuksiin, kiinteisiin kustannuksiin ja energiakustannuksiin. Näiden lisäksi on laskettu kunkin laitoksen kokonaiselinkaarikustannus sekä sen perusteella energian ominaiskustannus elinkaaren aikana toteutuneiden kustannusten ja energian tuotannon perusteella. CHP-yksiköiden tapauksessa energian ominaiskustannus sisältää sekä sähkön, että lämmön tuotannon. Koko elinkaaren ajalta laskettua energian ominaiskustannusta voidaan käyttää eri tuotantolaitosten keskinäisessä vertailussa, mutta tällöin täytyy muistaa, että vuotuinen käyttöaika vaikuttaa siihen suuresti. Esimerkiksi lyhyt käyttöaika johtaa yleensä suurempaan ominaiskustannukseen, koska investoinnin osuus siinä kasvaa. Kun tuotantolaitosten elinkaarikustannuksiin lisätään vielä siirtoverkoille ja energiakeskukselle määritetyt kustannukset, saadaan laskettua koko järjestelmän elinkaarikustannus. Siirtoverkkoihin ja energiakeskukseen liittyvät investointikustannukset ovat nyt 500 k€, kun taas kiinteiksi kustannuksiksi on laskettu 130 k€ ja energiakustannuksiksi 6147 k€ koko tarkastelujakson aikana. Edellä mainittu energiakustannus tarkoittaa nyt elinkaaren aikana ulkopuolisilta toimittajilta ostetun energian (tässä tapauksessa sähkön) muodostamaa kustannusta, kuitenkin siten, että siitä on vähennetty tuotantolaitosten käyttämän sähkön kustannukset, sillä ne on jo huomioitu taulukossa 14 esitetyissä energiakustannusten luvuissa. Järjestelmän yhteenlasketuksi elinkaarikustannukseksi saadaan 20 vuoden tarkasteluajalla ja 6 % nimelliskorolla 15209 k€.

Taulukko 14. Tuotantolaitosten muodostamat kustannukset elinkaaren aikana.

Tuotantolaitos	Investointi-kustannukset [k€]	Kiinteät kustannukset [k€]	Energia-kustannukset [k€]	Elinkaari-kustannukset yhteensä [k€]	Energian ominais-kustannus [€/MWh]
Pien-CHP 1	268	174	503	945	38,5
Pien-CHP 2	268	174	502	944	38,6
Hakekattila	1510	979	2953	5442	32,0
Maalämpö	293	42	240	575	55,9
Öljykattila	90	58	357	505	153,3
Aurinkokennot	19	2	0	21	70,2

### 7.3.3 Elinkaarikustannusten vertailu

Elinkaarikustannukset ovat usein yksi painavimmista päätöksenteon kriteereistä energiainvestointeja tarkastellessa. Taulukossa 15 on esitetty tähän tutkimukseen valittujen tapausten 20 vuoden elinkaaren aikaisten kustannukset nykyarvona. Kaikki tarkastellut tapaukset ovat elinkaarikustannusten puolesta parempia, kuin vertailutapaus (tapaus 1), jossa kaikki energia ostetaan ulkopuolisilta toimittajilta. Elinkaarikustannusten osalta parhaaksi ratkaisuksi osoittautuu tutkituista tapauksista numero 5. Nykyinen Koutalaen hybridienergiaratkaisun suunnitelma on tutkituista tapauksista toiseksi paras ja ero parhaaseen elinkaarikustannuksissa on +106 k€. Nämä ratkaisut ovat kuitenkin pääpiirteittäin samat. Merkittävimpana erona on maalämmön ja hakelaitoksen välinen mitoitusuhde. Tapauksessa 5 maalämmön teho-osuus on suurempi kuin tapauksessa 2 ja hakelaitoksen osuus vastaavasti pienempi. Pelkästään elinkaarikustannusten näkökulmasta suunnitelman muutos olisi periaatteessa kannattava, mutta ne eivät kuitenkaan ole ainoa lopullisen suunnitelman valintaan vaikuttava tekijä. Tämän lisäksi ennen suunnitelman mahdollista muuttamista tulee arvioida laskentaan liittyvien epävarmuustekijöiden roolia, tulosten luotettavuutta ja käytännön toteutusmahdollisuuksia. Näitä asioita käydään läpi myöhemmin seuraavassa luvussa.

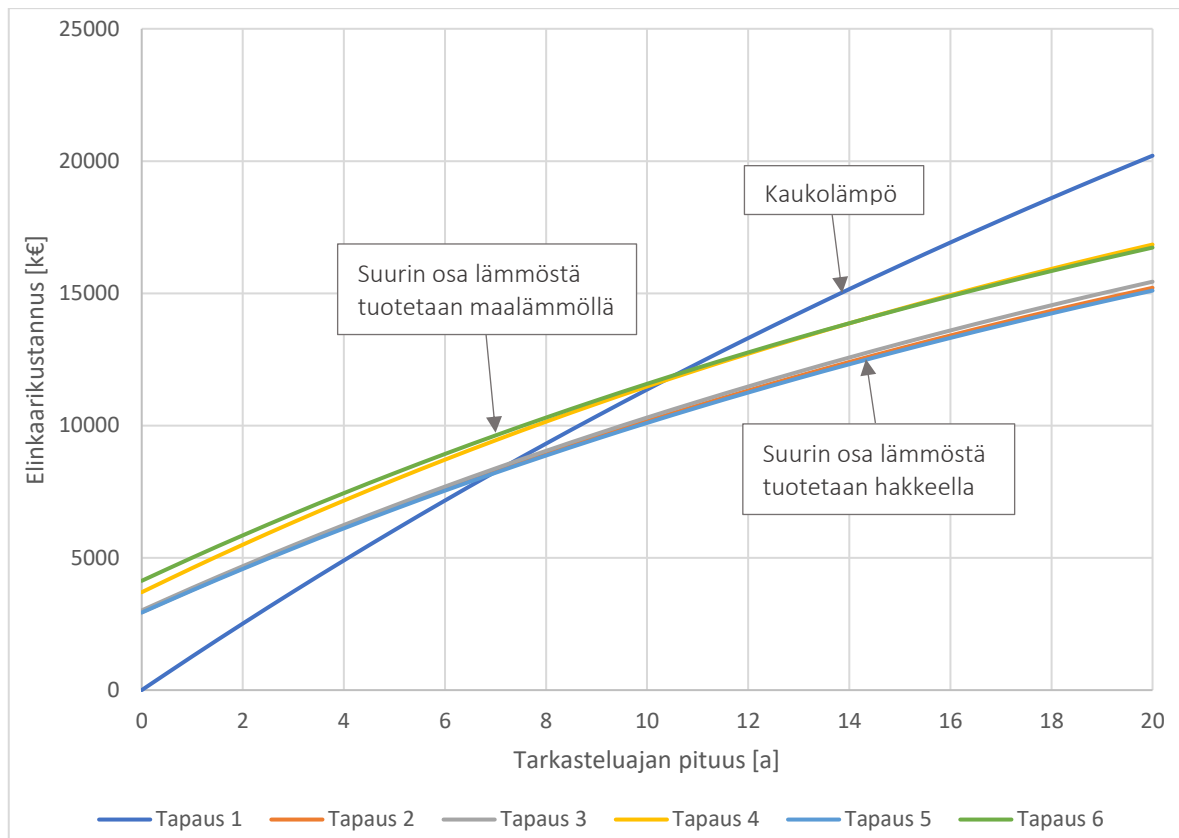
*Taulukko 15. Elinkaaren aikaisten kustannusten nykyarvot eri tapauksille.*

	Investointi- kustannukset [k€]	Kiinteät kustannukset [k€]	Energia- kustannukset [k€]	Elinkaari- kustannukset yhteensä [k€]
Tapaus 1	0	1751	18451	20202
Tapaus 2	2948	1627	10703	15209
Tapaus 3	3014	1514	10911	15439
Tapaus 4	3700	754	12389	16843
Tapaus 5	2931	1354	10818	15103
Tapaus 6	4132	1354	11243	16729

Kuvassa 43 on esitetty tutkittujen tapausten elinkaarikustannusten kehittyminen tarkasteluajan funktiona. Alueellisen järjestelmäinvestoinnin sisältävät ratkaisut ovat luonnollisesti kalliimpia lyhyellä tarkasteluajalla, mutta päätyvät olemaan halvempia pidemmällä aikavälillä pienempien energiakustannustensa ansiosta. Kuvasta voidaan lukea myös takaisinmaksuajat eri tapauksille. Takaisinmaksuaika on se ajankohta, jossa tarkasteltavan tapauksen elinkaarikustannuskäyrä leikkaa vertailutapauksen, eli tapauksen 1 elinkaarikustannuskäyrän. Tapauksille lasketut takaisinmaksuajat on esitetty myös taulukossa 16.

*Taulukko 16. Tutkituille tapauksille lasketut takaisinmaksuajat.*

	Takaisinmaksuaika [a]
Tapaus 2	7,0
Tapaus 3	7,5
Tapaus 4	10,5
Tapaus 5	7,0
Tapaus 6	10,5



Kuva 43. Elinkaarikustannusten kehittyminen tarkasteluajan kasvaessa.

## 7.4 Analyysitulosten tarkastelu

Seuraavaksi analyysituloksista vedetään tärkeimpiä päätelmiä ja tulkintoja, minkä lisäksi arvioidaan myös niiden luotettavuutta ja epävarmuustekijöitä. Energian tarpeiden analyysien osalta merkittävin asia, mitä niistä voidaan sanoa lukuarvojen lisäksi, on se, että kylpylähotellin simulaatiosta saadut tulokset hallitsevat kokonaisuutta. Tämä on kuitenkin luonnollista, sillä kylpylähotelliin kuuluville rakennuksille on varattu suurin kerrospinta-ala. Kylpylähotellin simulointitulosten suuri vaikutus kokonaisuuteen on kuitenkin tärkeä tiedostaa, sillä suunnitelmien mahdolliset muutokset tulevaisuudessa voivat johtaa merkittäviin vaikutuksiin myös energiasijustelmien mitoituksissa ja kannattavuudessa. Esimerkiksi odotettua suuremmat energian tarpeet tai uusien rakennusten lisääminen järjestelmään voi aiheuttaa nykyisen mitoituksen riittämättömyyden.

Energian tarpeiden analyysiin liittyy myös epävarmuustekijöitä. Olemassa olevien rakennusten energian tarpeet määritettiin nyt energian myyjiltä saatujen mittaustietojen avulla. Mittaustietoja voidaan itsessään pitää luotettavina, mutta niihin liittyy jonkin verran vuotuista vaihtelua, jota ei täysin pystytä eliminoimaan. Tämä vaihtelu aiheutuu pääasiassa erilaisista sääolosuhteista ja käyttöajoista eri vuosien välillä. Sääolosuhteiden vaihteluiden vaikutus on pyritty minimoimaan normittamalla lämmöntarpeet, mutta täysin sitä ei silti pystytä poistamaan. Energiasimulointien tuloksiin taas syntyy epävarmuutta pääasiassa lähtöarvoista ja oletuksista. Esimerkiksi rakennusten käyttöaikoja on vaikea ennustaa etukäteen ja toisaalta niillä voi olla hyvinkin suuri vaikutus rakennuksen energian tarpeeseen. Energiasimulointien menetelmät eivät myöskään ole täysin tarkat vaan ne sisältävät oletuksia ja yksinkertaistuksia. Tietyllä tapaa energiasimuloinnin tulokset ovatkin



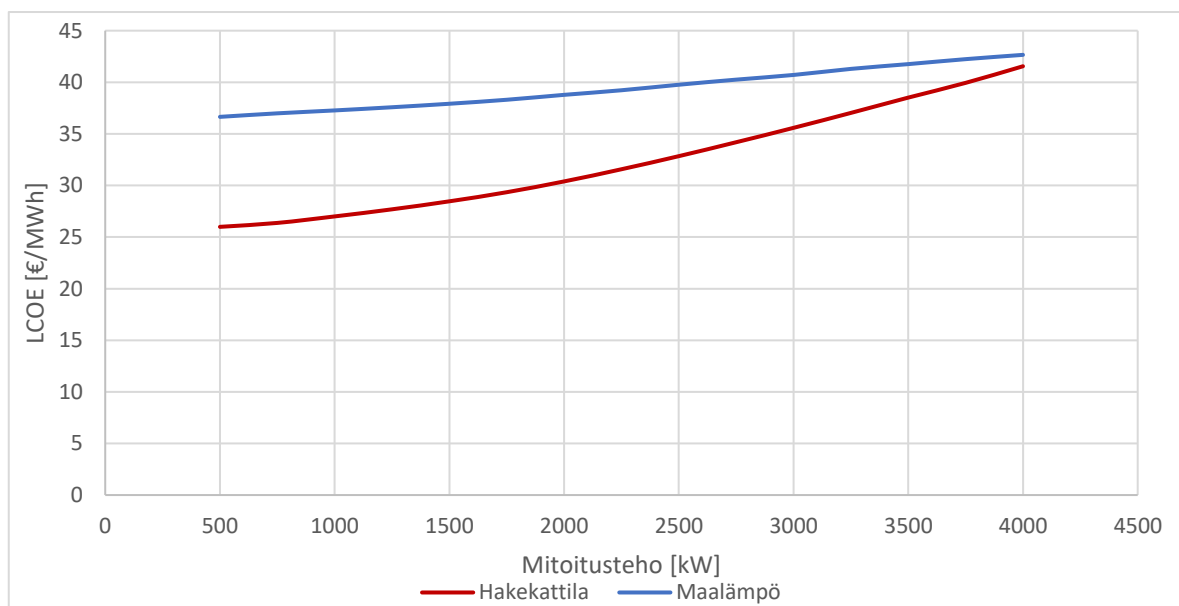
vain valistunut arvaus todellisista energian tarpeista. Niinpä alueen energian tarpeiden laskentaa on syytä päivittää suunnitelmien muuttuessa ja tarkentuessa.

Tässä työssä tehtiin myös tarkastelu nykyisen energiajärjestelmän mitoituksista ja kannattavuudesta. Tehdyn analyysin perusteella voidaan sanoa nykyisen suunnitelman olevan järkevä ja selvästi taloudellisesti kannattava. Nykyisen suunnitelman mukaisella järjestelmällä pystyttäisiin tuottamaan paikallisesti kaikki tarvittava lämmitysenergia. Toisaalta paikallisesti tuotetun sähköenergian määrä on melko pieni, vain noin 11 % kokonaistarpeesta. Paikallisen sähköntuotannon kapasiteetin lisääminen voisi olla taloudellisesti kannattavaa, mutta tätä vaihtoehtoa ei tässä työssä ole tarkasteltu. Näin ollen sen kannattavuudesta ei voida varmuudella sanoa kovinkaan paljoa. Nykyisessä suunnitelmassa laitosten käyttöjärjestys on myös valittu järkevästi. Pienen mittakaavan yhteistuotannon yksiköitä voidaan käyttää täydellä teholla läpi vuoden, minkä takia niitä kannattaa ajaa ensimmäisenä. Hakekattila on halvin lämmön tuotannon yksikkö, joten se kannattaa mitoittaa kattamaan loput alueen peruskuormasta. Yleensä perustuotanto mitoitetaan kattamaan 40 – 60 % maksimikapasiteetista (Energiatieteellisyys 2012). Nyt perustuotantoon valitut kaksi pienen mittakaavan CHP-yksikköä ja hakekattila kattavat noin 52 % maksimikapasiteetista. Huippukuorma kannattaa puolestaan kattaa ensin maalämmöllä ja seuraavaksi öljykattilalla, niin kuin nykyisen suunnitelman mukaan tehdäänkin.

Koutalelle suunniteltavan hybridienergiajärjestelmän suunnittelussa haasteena on myös alueen rakentaminen vaiheissa. Alueen energian tarpeet siis muuttuvat sitä mukaan, kun hanke etenee. Energiajärjestelmän osalta tämä tarkoittaa sitä, että kaikkia laiteinvestointeja ei välttämättä kannata tehdä heti hankkeen alussa. Esimerkiksi nykyisen suunnitelman mukaan mitoitettu hakekattila riittäisi kattamaan ensimmäisen vaiheen jälkeisen lämmöntarpeen kokonaisuudessaan. Hakekattila vaatii kuitenkin vuosihuollon, joten sen rinnalle täytyy hankkia myös jokin varajärjestelmä. Varajärjestelmä tarvitaan myös mahdollisten vikatilanteiden varalta. Nykyisen mitoituksen mukainen öljykattila pystyisi myös kattamaan ensimmäisen rakennusvaiheen jälkeisen huipputehon tarpeen vikatilanteen sattuessa. Myös mahdollisiin suunnitelmien muutoksiin on helpompi reagoida, mikäli energian tuotantojärjestelmiä rakennetaan vähitellen hankkeen edetessä. Siirtoverkot tulisi kuitenkin mitoittaa lopullisten tehon tarpeiden mukaan alusta lähtien.

Tarkastelemalla tapausten 1 – 6 elinkaarikustannuksia voidaan vetää jotain johtopäätöksiä energian tuotannon vaihtoehtoisista mitoituksista ja eri tuotantoyksiköiden taloudellisista kannattavuuksista. Ensimmäinen havainto on, että paikallinen energiantuotanto on kaikkien tarkasteltujen tapauksien kohdalla taloudellisesti kannattavaa. Kaikissa tapauksissa energiakustannukset kattavat suurimman osan kokonaisuudesta, minkä seurauksena energian hinta on suurin yksittäinen vaikuttava tekijä kustannusten muodostumiseen. Tuloksista nähdään myös, että polttoprosesseihin perustuvat ratkaisut ovat taloudellisesti kannattavampia kuin maalämpöön perustuvat ratkaisut. Tässä vertailussa erot johtuvat perustuotantoon valittujen laitosten erilaisista teknisistä ja taloudellisista ominaisuuksista. Yleisesti perustuotannoksi kannattaa valita se laitos, jolla on pienimmät energiakustannukset. Toisaalta tällaisten laitosten investointikustannukset ovat usein muita suuremmat. Kustannusnäkökulmasta katsottuna vain kaksi tarkastelluista lämmön tuotantomenetelmistä sopisi kattamaan peruskuorman. Nämä ovat hakekattilalaitos ja maalämpö. Tapauksien 3 ja 4 avulla voidaan vertailla hakekattilan ja maalämmön ominaisuuksia perustuotannossa, kun kumpakin käytetään yksinään. Tapauksia 5 ja 6 vertaamalla nähdään käyttöjärjestyksen vaikutus kustannuksiin, kun perustuotannossa käytetään sekä hakekattilaa, että maalämpöä.

Kuvassa 44 on vertailtu koko elinkaaren aikaisia laitoskohtaisia lämpöenergian tuotantohintoja (LCOE) erikokoisilla laitosten mitoituksilla. Näissä tarkasteluissa on oletettu, että lämpöä tuotetaan vain hakekattilalla tai maalämmöllä. Kuvasta nähdään selvästi, että hakelaitos on ainakin tässä tapauksessa aina maalämpöä kannattavampi tuotantolaitos peruskuorman kattamiseen. Tässä kohtaa on kuitenkin syytä huomata, että tilanne voi muuttua, jos jotain laskennan monista parametreista muutetaan. Myös lämmön tarpeen profilissa tapahtuvat vaihtelut voivat muuttaa tilannetta jommallekummalle tuotantolaitokselle edullisemmaksi. Koutalaen tapauksessa näyttää kuitenkin siltä, että hakelaitos on maalämpöä kannattavampi perustuotannossa. Sama johtopäätös voidaan vetää myös vertaamalla tapausten 3 ja 4 kustannuksia. Tämän työn analyysien perusteella maalämpö on kuitenkin kannattava investointi, kun sillä katetaan osa lämmön huipputarpeesta tai jos sitä käytetään peruskuorman kattamiseen hakekattilan jälkeen järkevällä tehomitoituksella.



Kuva 44. Energian tuotantokustannukset hakekattilalla ja maalämmöllä perustuotannossa.

Maalämmön verraten huonoon kannattavuuteen vaikuttaa tässä tapauksessa muutama asia. Ensimmäinen näistä on Koutalaen matalat kalliolämpötilat, minkä seurauksena maalämpöpumpun lämpökertoimen arvot jäävät alhaisiksi. Tämän työn analyysien perusteella maalämpöpumpun COP jää arviolta lukuarvojen 2,5 ja 2,9 välille. Lämpökertoimen arvoa voitaisiin parantaa poraamalla lämpökaivot syvemmälle maaperään tai alentamalla lämmön siirtoverkoston lämpötilatasoja, mutta kummatkin näistä ratkaisuista sisältävät omat ongelmansa. Esimerkiksi eräs todennäköinen lämpökaivojen syventämisestä aiheutuva haitta on maalämpöjärjestelmän investointikustannusten suureneminen. Toinen syy maalämmön huonompaan kannattavuuteen on se, että maalämpökenttä täytyy mitoittaa siitä otettavan energian mukaan. Mitä suurempi osa kuormasta halutaan kattaa maalämmöllä, sitä enemmän kentästä täytyy ottaa energiaa ja sitä suuremmaksi se täytyy mitoittaa, jotta voidaan taata sen tehokas käyttö koko järjestelmän elinkaaren ajan. Suurempi maalämpökenttä tarkoittaa luonnollisesti myös suurempia investointikustannuksia järjestelmälle. Lisäksi suuren maalämpökentän käytännön toteutus voi olla ongelmallista sen tilan tarpeen kannalta. Maalämmön huonompaan kilpailukykyyn vaikuttaa tässä tapauksessa myös metsähakkeen halpa hinta ja hidas arvioitu hintakehitys muihin polttoaineisiin verrattuna. Edellä mainitut syyt selittävät myös elinkaarikustannusten eron tapausten 5 ja 6 välillä, joiden avulla vertailtiin hakkeeseen ja maalämpöön pääosin perustuvia ratkaisuja.

Koutalaen alueellisen lämpöverkon menoveden lämpötilatasoksi asetettiin tässä työssä 70 °C, jolloin se on vielä riittävä lämpimän käyttöveden asettamien vaatimusten täyttämiseen. Verkostolämpötilaa laskemalla voitaisiin parantaa maalämpöpumpun ja aurinkolämmön tuotannon tehokkuutta sekä mahdollisesti pienentää verkoston lämpöhäviöitä. Tällöin käyttöveden lämmitykseen tarvittaisiin kuitenkin rakennuskohtaiset lisälämmittimet, jotka todennäköisesti toimisivat sähköllä. Nykyisessä suunnitteluratkaisussa maalämpö on mitoitettu niin pieneksi osaksi kokonaistuotannosta, ettei verkostolämpötilojen alentaminen alle 70 °C ole perusteltua. Mikäli hybridienergiakeskuksen osalta päädytään suurimmaksi osaksi maalämpöpumppuun perustuvaan ratkaisuun, voi verkostolämpötilojen alentaminen osoittautua kannattavaksi. Tällöin täytyy kuitenkin tehdä erillinen tarkastelu, jossa arvioidaan maalämmön tehokkuuden parantumisen, verkoston mahdollisten lämpöhäviöiden ja pumppausenergian tarpeen muutosten sekä käyttöveden lisälämmityksen tarpeen vaikutukset järjestelmäkokonaisuuteen.

Edellä esitetyt päätelmät perustuvat pääosin tässä tutkimuksessa suoritettujen kannattavuustarkastelujen tuloksiin. Päätelmien yhteydessä on kuitenkin hyvä tiedostaa kustannuslaskennassa tehtyjen oletusten vaikutukset tuloksiin ja niihin liittyvät epävarmuustekijät. Aiemmin todettiin, että energiakustannukset ovat merkittävien tekijä järjestelmävaihtoehtojen elinkaarikustannusten muodostumisessa ja että energian hintakehityksellä on keskeinen vaikutus analyysin lopputulokseen. Toisaalta energian ja polttoaineiden hintakehitykseen vaikuttaa todellisuudessa useat markkinoihin ja poliittisiin päätöksiin liittyvät tekijät ja niinpä sen tarkka ennustaminen onkin erittäin hankalaa. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa energian ja polttoaineiden hintakehityksen on arvioitu jatkuvan samanlaisena, kuin mitä se on tähän mennessä ollut, mikä useimmissa tapauksissa tarkoittaa melko jyrkkää hinnan nousua. Erityisesti muutokset ostoenergian hintakehityksessä vaikuttavat hybridienergiahankkeen kannattavuuteen. Sähkön hintakehitys on tässä tutkimuksessa arvioitu melko maltilliseksi, kun taas kaukolämmön hinnan nousu melko suureksi. Tämän lisäksi alueelle suunniteltu tekninen ratkaisu keskittyy pääosin lämpöenergian tuotantoon, minkä johdosta hankkeen kannattavuus huononee merkittävästi, jos kaukolämmön hinnan nousu on arvioitua hitaampaa. Toisaalta keskittyminen nimenomaan lämmöntuotantoon on kannattavaa kaukolämmön arvioidun melko nopean hintakehityksen takia.

Tässä työssä ei ole myöskään tehty tarjouskyselyitä laitetoimittajille energianjärjestelmän ja sen komponenttien investointi- tai ylläpitokustannusten selvittämiseksi, vaan analyysissa on käytetty joko aiemmin tehtyjä arvioita tai kirjallisuuslähteistä saatuja yleisiä hintatasoja. Taloudellisissa laskelmissa ei myöskään ole otettu huomioon esimerkiksi suunnittelun aiheuttamia kustannuksia tai mahdollisia investointitukia. Voidaan siis todeta, että kustannuslaskennassa tehdyistä oletuksista aiheutuu myös merkittävää epävarmuutta tuloksiin. Näin ollen myös kustannuslaskelmien lähtötietoja tulee päivittää hankkeen edetessä tarkempien tuloksien saamiseksi. Edellä mainituista varauksista huolimatta voidaan todeta, että Koutalaen alueellisen hybridienergiajärjestelmän toteuttaminen nykyisellä suunnitelmalla olisi taloudellisesti perusteltua.

## 8 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää alueellisen hybridienergiaratkaisun analysointiin tarkoitettu esisuunnitteluvaiheen menetelmä ja laskentatyökalu, joilla saadaan tietoa ratkaisun teknistaloudellisista ominaisuuksista. Laskentatyökalun osalta pyrittiin myös helppokäyttöisyyteen sekä joustavuuteen ja se toteutettiin Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmaan hyödyntäen sen VBA-ominaisuuksia. Toteutustapaan päädyttiin osittain asetettujen tavoitteiden ja osittain tekijän oman osaamisen johdosta. Kehitystyön tuloksena saatiin suhteellisen helppokäyttöinen työkalu, jolla voidaan tarkastella alueellisessa järjestelmässä esiintyviä energiavirtoja sekä laskea sen elinkaarikustannukset. Helppokäyttöisyys kärsii kuitenkin jonkin verran alueellisten hybridienergiajärjestelmien analysoinnin luontaisesta monimutkaisuudesta. Toisin sanoen laskentatyökalun käyttäjältä vaaditaan pohjatietoja alueellisiin hybridienergiajärjestelmiin liittyen muun muassa rakennusten energialaskennan, energian tuotannon ja siirron, sekä taloudellisten laskelmien osalta. Tämän lisäksi laskentatyökalun käyttäjän olisi hyvä tuntea analyysimenetelmään sisältyvät periaatteet ja oletukset.

Joustavuustavoitteesta jouduttiin niin ikään tinkimään osittain helppokäyttöisyyden, sekä osittain työn aikataulun ja laajuuden asettamien rajoitusten seurauksena. Esimerkiksi työkaluun sisällytettyjen energian tuotantolaitosten määrä on rajattu case-tutkimuksessa tarvittaviin yksiköihin. Toisaalta ne mallit, jotka tämän työn piirissä toteutettiin, ovat pääsääntöisesti yleispäteviä. Ehkä suurin joustavuuteen negatiivisesti vaikuttava tekijä onkin työkalussa käytetty oletus energiajärjestelmän perusrakenteesta, jonka mukaan kaikki energia siirretään tuotannosta käyttäjille alueellisten energiaverkkojen kautta. Tämä oletus luonnollisesti rajoittaa työkalun sovelluskohteita. Sopiviin kohteisiin tässä työssä kehitetyllä laskentatyökalulla saadaan kuitenkin arvokasta tietoa hankkeen teknistaloudellisista ominaisuuksista. Myös erilaisten vaihtoehtojen vertailu on suhteellisen helppoa, mikä tukee hyvin päätöksentekoa. Työkalulle löydettiin myös useita jatkokehitysmahdollisuuksia. Näitä ovat muun muassa uusien energian tuotantolaitosten ja pitkäaikaisen energian varastoinnin mallinnusten lisääminen, tuotannon optimointimenetelmän kehittäminen sekä taloudellisten herkkyystarkastelujen tekemisen sujuvoittaminen.

Analyysimenetelmän ja laskentatyökalun kehityksen lisäksi tässä työssä suoritettiin Levin Koutalalle suunnitellun alueellisen hybridienergiajärjestelmän analyysit. Koutalaen alueen laajennuksen tulevalle rakennuskannalle laskettiin vuotuiset energian tarpeet, joiksi saatiin 9831 MWh lämmitysenergiaa, 534 MWh jäähdytysenergiaa sekä 5821 MWh sähköenergiaa. Alueellisen hybridienergiajärjestelmän osalta katsottiin järkeväksi, että tarvittava jäähdytysenergia tuotetaan rakennuskohtaisesti sähköllä ja alueelle rakennettaisiin vain lämmitys- ja mahdollisesti myös sähköenergian siirtoverkot. Alueellisen lämpöverkon menoveden lämpötilaksi asetettiin 70 °C. Hybridienergiaratkaisuun sisältyvän tuotannon osalta puolestaan tarkasteltiin nykyistä hakekattilalaitokseen perustuvaa suunnitelmaa, sekä muutamaa vaihtoehtoista ratkaisua. Nykyisellä suunnitelmalla metsähaketta tarvitaan arviolta 12909 MWh/a ja kevyttä polttoöljyä arviolta 281 MWh/a. Lisäksi tarvitaan ostosähköä noin 5616 MWh/a.

Työssä suoritettujen vaihtoehtoisten energian tuotannon mitoitustarkastelujen tarkoituksena oli löytää suuntaviivat järjestelmän elinkaarikustannusten minimointiin. Tarkasteluun valittuja mitoitusvaihtoehtoja vertailtiin keskenään elinkaarikustannusten perusteella. Vertailun lopputuloksena voidaan todeta, että metsähakkeen polttoon pääosin perustuvat ratkaisut ovat taloudellisesti kannattavampia, kuin maalämpöön perustuvat ratkaisut.

Metsähakkeeseen perustuvien tuotantoratkaisujen takaisinmaksuajat olivat 7 – 7,5 vuotta, kun maalämpöön perustuvilla vaihtoehtoilla takaisinmaksuajat olivat 10 – 10,5 vuotta. Takaisinmaksuajat laskettiin vertaamalla hybridienergiajärjestelmälle laskettuja elinkaarikustannuksia tilanteeseen, jossa kaikki energia ostetaan kaukolämpö- ja sähköverkoista. Analyysien perusteella hybridienergiajärjestelmän energian tuotanto kannattaa siis suunnitella pohjautumaan hakkeen polttoon. Lisäksi voidaan todeta, että nykyinen hybridienergiakeskuksen suunnitelma on sekä järkevä tuotannon mitoitusten ja käyttöjärjestyksen kannalta, että taloudellisesti kannattava. Toisaalta omaan energian tuotantoon investoiminen oli tehtyjen analyysien perusteella yleisestikin kannattavaa. Lisäksi on syytä huomata, että tarkastelut keskittyivät ratkaisuihin, joissa tuotetaan pääasiassa vain lämpöenergiaa ja esimerkiksi oman sähköntuotannon osuuden lisäämisen kannattavuus jäi tarkastelematta. Näin ollen energian tuotantorakenteessa voi olla vielä mahdollisuuksia suurempiin kustannussäästöihin.

Tässä tutkimuksessa tehtyihin analyysihin liittyy myös melko paljon epävarmuustekijöitä, joista suurimmat liittyvät hybridienergiajärjestelmän investointi- ja huoltokustannuksiin sekä energian hinnan kehitykseen tulevaisuudessa. Tulosten virhemarginaali on hankala arvioida useista virhelähteistä johtuen, minkä takia tuloksiin kannattaa suhtautua enemmänkin suuntaa antavina. Näistä varauksista huolimatta tuloksia voidaan käyttää Levin Koutalaen hankkeen eteenpäin viemiseen, kunhan lähtötietoja ja laskelmia muistetaan tarkentaa suunnitteluprosessin edetessä.

## Lähteet

Adven Oy. (2019) Kaukolämpö – Alueet ja hinnat – Levi [verkkajulkaisu]. [viitattu 3.3.2019] Saatavissa: <https://www.adven.fi/kaukolampo/alueet-hinnat/levi/>

Auvinen, K (2016) Aurinkolämpöjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus [verkkajulkaisu]. Aalto-yliopisto. [viitattu 3.3.2019] Saatavissa: <http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankintaohjeita/aurinkolampojarjestelmien-hintatasot-ja-kannattavuus-suomessa/>

Auvinen, K & Jalas, M. (2017) Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus [verkkajulkaisu]. Aalto-yliopisto. [viitattu 3.3.2019] Saatavissa: <http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankintaohjeita/aurinkosahkon-hinnat-ja-kannattavuus/>

Averfalk, H. & Werner S. (2018) Novel low temperature heat distribution technology. Energy. Vol. 145. S. 526-539. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.157. ISSN 0360-5442.

Chiasson, A.D. (2016) Geothermal Heat Pump and Heat Engine Systems: Theory and Practice. Chichester, Yhdistynyt kuningaskunta: John Wiley & Sons Ltd. 473 s. ISBN 978-1-118-96197-1.

Duffie, J.A. & Beckman, W.A. (2013) Solar engineering of thermal processes, 4<sup>th</sup> edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Ltd. 910 s. ISBN 978-1-118-41541-2.

Energiatoteellisuus. (2012) Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Saatavissa: [https://energia.fi/files/393/Pienten\\_polttolaitosten\\_palamisen\\_hallinta\\_loppuraportti.pdf](https://energia.fi/files/393/Pienten_polttolaitosten_palamisen_hallinta_loppuraportti.pdf)

Euroopan komissio. (2017) Photovoltaic geographical information system, Overview of PVGIS data sources and calculation methods [verkkajulkaisu]. [viitattu 12.3.2019] Saatavissa: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_static/methods.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/methods.html)

Faiman, D. Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. (2008) Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 16. S. 307-315. DOI: 10.1002/pip.813.

Fathima, A. Hina & Palanisamy, K. (2015) Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 45. S. 431-446. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.059. ISSN 1364-0321.

FINVAC ry. (2017) Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen. FINVAC ry. Helsinki. Saatavissa: <https://www.talotekniikkainfo.fi/esimerkit/ilmanvaihdon-mitoituksen-perusteet>.

Foucquier, A. & Robert, S. & Suard, F. & Stéphan, L. & Jay, A. (2013) State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 23. S. 272-288. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.004. ISSN 1364-0321.

Fumo, N. (2014) A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 31. S. 53-60. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.040. ISSN 1364-0321.

Gabrielli, P. & Gazzani, M. & Martelli, E. & Mazzotti, M. (2018) Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage. *Applied Energy*. Vol. 219. S. 408-424. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.142. ISSN 0306-2619.

Gu, W. & Wu, Z. & Bo, R. & Liu, W. & Zhou, G. & Chen, W. & Wu, Z. (2014) Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 54. S. 26-37. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028. ISSN 0142-0615.

Huld, T. & Friesen, G. & Skoczek, A. & Kenny, R.P. & Sample, T. & Field, M. & Dunlop, E.D. (2011) A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol. 95:12. S. 3359-3369. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.07.026. ISSN 0927-0248.

Huld, T. & Gracia Amillo, A.M. (2015) Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. *Energies*. Vol. 8. S. 5159-5181. DOI: 10.3390/en8065159. ISSN 1996-1073.

Ilmatieteen laitos. (2019) Lämmitystarveluvut [verkkojulkaisu]. [viitattu 28.1.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Jylhä, K. & Kalamees, T. & Tietäväinen, T. & Ruosteenoja, K. & Jokisalo, J. & Hyvönen, R. & Ilomets, S. & Saku, S. & Jutila, A. (2011) Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2011:6. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/33069>.

Koehl, M. & Heck, M. & Wiesmeier, S. Wirth, J. (2011) Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Solar Energy & Solar Cells*. Vol. 95:7. S. 1638-1646. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.01.020. ISSN 0927-0248.

Kukkonen, I & Valjus, T. (2006) Levitunturin Koutalaen kalliolämpöhanke - Esiselvitys alueen kallioperästä ja kalliolämpötiloista. Geologian tutkimuskeskus, Etelä-Suomen yksikkö. Espoo.

Labouret, A & Villos, M. (2010) Solar photovoltaic energy. Lontoo, Yhdistynyt kuningaskunta: The Institution of Engineering and Technology. 358 s. ISBN 978-1-84919-155-5.

Laitinen, A. & Tuominen, P. & Holopainen, R. & Tuomaala, P. & Jokisalo, J. & Eskola, L. & Sirén, K. (2014) Suomalaisten lämpöpumppujen uusiutuvan energian tuotto, SPF-hankkeen loppuraportti. VTT Technology 164. VTT. ISBN 978-951-38-8141-2.

Leppänen arkkitehdit Oy. (2018) Levi North Star Villat ja hybridivoimala. Arkkitehtisuunnitelmat 21.12.2018.

- Li, Z. & Xu, Y. (2018) Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes. *Applied Energy*. Vol. 210. S. 974-986. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.197. ISSN 0306-2619.
- Luna-Rubio, R. & Trejo-Perea, M. & Vargas-Vázquez, D. & Ríos-Moreno, G.J. (2012) Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*. Vol. 86:4. S. 1077-1088. DOI: 10.1016/j.solener.2011.10.016. ISSN 0038-092X.
- Luoranen, J. (2017) Teollisen kokoluokan lämpöpumppukoneikon tekniikka ja talous. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 85 s.
- Mancarella, P. (2014) MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*. Vol. 65. S. 1-17. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041. ISSN 0360-5442.
- Petchers, N. (2012) Combined heating, cooling & power handbook: Technologies & applications (2<sup>nd</sup> edition). Lilburn, GA, Yhdysvallat: The Fairmont Press, Inc. 872 s. ISBN 0-88173-690-2 (sähköinen).
- Pihlainen, I. (2018) Raportti - Koutalaen hybridiennergiakeskuksen esisuunnittelu. Boyard Oy. Espoo.
- Raiko, M & Mäki-Mantila, E. (2005) Lämpöpumput ja niiden vaikutus sähköntuotantoon. Enprima Oy.
- Rivarolo, M. & Cuneo, A. & Traverso, A. & Massardo, A.F. (2016) Design optimization of smart poly-generation energy districts through a model based approach. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 99. S. 291-301. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.108. ISSN 1359-4311.
- Satakunnan ammattikorkeakoulu. (2002) Hakelämpökeskuksen hankinta. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Suomen Kaukolämpö ry, Motiva Oy, Huoltovarmuuskeskus, Suomen Kuntaliitto. ISBN 951-755-783-3.
- Seppänen, O. (2001) Rakennusten lämmitys 2. painos. Helsinki, Suomi: Suomen LVI-liitto ry. 444 s. ISBN 951-98811-0-7 (painettu).
- SFS-EN ISO 13363-1. (2007) Solar protection devices combined with glazing. Calculation of solar and light transmittance. Part 1: Simplified method. Suomen standardisoimisliitto SFS. 13 s.
- SFS-EN ISO 13790. (2008) Rakennusten energiatehokkuus. Lämmityksen ja jäähdytyksen energian tarpeen laskenta. Suomen standardisoimisliitto SFS. 156 s.
- SFS-EN ISO 9806:2017. (2017) Solar Energy. Solar thermal collectors. Test methods. Suomen standardisoimisliitto SFS. 90 s.
- Sirén, K. (2015a) Rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeen laskenta yksinkertaisella tuntitason mallilla. Aalto-yliopisto.



Sirén, K. (2015b) Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Aalto-yliopisto.

Sorvari, J. (2015) Konesalin ylijäämälämmön hyödyntäminen Levin Koutalaella. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 86 s.

Suomen virallinen tilasto (SVT). (2017) Suomen tilastollinen vuosikirja 2017. Helsinki, Finland. Edita Publishing Oy. 603 s. ISBN 978-952-244-579-7 (sähköinen). ISBN 978-952-244-578-0 (painettu).

Suomen virallinen tilasto (SVT). (2019) Kuluttajahintaindeksi [verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN 1796-3524. [viitattu 25.2.2019] Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/khi/tau.html>

Tilastokeskus. (2019) Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN 1799-7984. [viitattu 25.2.2019] Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehi/tau.html>.

Viholainen, J. & Luoranen, M. & Väisänen, S. & Niskanen, A. & Horttanainen, M. Regional level approach for increasing energy efficiency. Applied Energy. Vol. 163. S. 295-303. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.101

Ympäristöministeriö. (2017) Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. Saatavilla: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus)

Ympäristöministeriö. (2018a) Euroopan unionin ilmastopolitiikka [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.3.2019] Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Euroopan\\_unionin\\_ilmastopolitiikka](https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka)

Ympäristöministeriö. (2018b) Energiatehokkuus - rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Saatavilla: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiatehokkuus)